

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА "ХПИ"

**Сборник научных трудов
Тематический выпуск
"Проблемы совершенствования
электрических машин и аппаратов"**

60'2011

Издание основано Национальным техническим университетом
"Харьковский политехнический институт" в 2001 году

Государственное издание

Свидетельство Госкомитета по информационной политике Украины

КВ № 5256 от 2 июля 2001 года

КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

Л.Л. Товажнянский, д-р техн. наук, проф.

Секретарь

К.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц.

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.

Е.И. Сокол, д-р техн. наук, проф.

Е.Е. Александров, д-р техн. наук, проф.

Л.М. Бесов, д-р техн. наук, проф.

Б.Т. Бойко, д-р техн. наук, проф.

Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.

М.Д. Годлевский, д-р техн. наук, проф.

А.И. Грабченко, д-р техн. наук, проф.

В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.

В.Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.

И.Ф. Домнин, д-р техн. наук, проф.

В.В. Елифанов, канд. техн. наук, проф.

Ю.И. Зайцев, канд. техн. наук, проф.

О.П. Качанов, д-р техн. наук, проф.

В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.

С.И. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.

В.М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.

В.И. Кравченко, д-р техн. наук, проф.

Г.В. Лисачук, д-р техн. наук, проф.

В.С. Лупиков, д-р техн. наук, проф.

О.К. Морачковский, д-р техн. наук, проф.

В.И. Николаенко, канд. ист. наук, проф.

П.Г. Перерва, д-р техн. наук, проф.

В.А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.

М.И. Рыщенко, д-р техн. наук, проф.

В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.

Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.

Ю.В. Тимофеев, д-р техн. наук, проф.

Н.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Ответственный редактор:

В.С. Лупиков, д-р техн. наук, проф.

Заместитель ответственного редактора:

В.Ф. Болюх, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь:

А.Г. Середа, канд. техн. наук, доц.

Члены редколлегии:

В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.

В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.

Б.В. Клименко, д-р техн. наук, проф.

В.И. Кравченко, д-р техн. наук, проф.

В.И. Милых, д-р техн. наук, проф.

В.П. Себко, д-р техн. наук, проф.

Е.И. Сокол, д-р техн. наук, проф.

Адрес редколлегии: 61002,
Харьков, ул. Фрунзе, 21. НТУ
"ХПИ".

Каф. ЭА. Тел. (057) 707-68-64
E-mail: lupikov@kpi.kharkov.ua

Харьков 2011

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 60. – 152 с.

Випуск приурочений до Міжнародного симпозіуму "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика" (SIEMA'2011), 26 – 28 жовтня 2011 року, Харків, НТУ "ХПІ". В збірнику висвітлюються проблеми удосконалення електричних машин і апаратів, досягнення вчених, вузів і підприємств України та інших країн.

Для наукових співробітників, викладачів, аспірантів, спеціалістів.

The issue is dated to the International Symposium "Problems of electric machines and apparatus perfection. Theory and practice" (SIEMA'2011), October 26-28, 2011, Kharkov, NTU "KPI". The collection presents papers on electric machines and apparatus, achievements of scientists, specialists of high schools and enterprises in Ukraine and other countries.

The issue is addressed to scientists, teachers, post-graduate students and experts.

Выпуск приурочен к Международному симпозиуму "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика" (SIEMA'2011), 26 – 28 октября 2011 года, Харьков, НТУ "ХПИ". В сборнике освещаются проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов, достижения ученых, вузов и предприятий Украины и других стран.

Для научных сотрудников, преподавателей, аспирантов, специалистов.

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" включено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (додаток до Постанови Президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4, п. 20, технічні науки).

**Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ";
Протокол № 12 від 12.12.2011**

© Національний технічний університет "ХПІ", 2011

И.С. ВАРШАМОВА, м.н.с., НТУ "ХПИ", Харьков
О.А. ГЕЛЯРОВСКАЯ, ст. преподаватель, НТУ "ХПИ", Харьков
Н.В. КРЮКОВА, ст. преподаватель, НТУ "ХПИ", Харьков
В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук., проф., зав. каф., НТУ "ХПИ", Харьков
Ю.Д. РУДАС, с.н.с., НТЦ МТО НАН Украины, Харьков
К.А. САВЧЕНКО, студент, НТУ "ХПИ", Харьков

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ

Приведено результати аналізу рівнів зовнішнього магнітного поля електричних підстанцій. Обґрунтовано можливості використання параметричних систем автоматичної компенсації їх магнітного поля.

Приведены результаты анализа уровней внешнего магнитного поля электрических подстанций. Обоснованы возможности использования параметрических систем автоматической компенсации их магнитного поля.

Введение. Электрические подстанции (ЭП) являются электроустановками, предназначенными для преобразования и распределения электроэнергии. В жилых зонах городов они используются в виде трансформаторных подстанций и распределительных устройств. Такие ЭП представляют собой совокупность разнообразного электрооборудования (ЭО): трансформаторов (Тр), распределительных шкафов либо устройств (РУ), шинопроводов, кабелей, кабельных вводов, электрических аппаратов (ЭА). При работе ЭО создает внешнее магнитное поле (ВМП) в основном на частоте сети (50 Гц), которое присутствует как внутри, так и снаружи ЭП. Это поле действует на людей и на технические средства – электрические аппараты защиты, управления и автоматики. В первом случае существует проблема экологической безопасности человека при действии так называемого биотропного магнитного поля [1, 2], во втором – проблема электромагнитной совместимости [3, 4], при действии ВМП на чувствительные к нему технические средства. Общеизвестно, что уменьшение уровня ВМП обеспечивает решение обеих проблем.

Цель работы – обоснование перспектив применения автоматической компенсации магнитного поля электрических подстанций.

Анализ уровней ВМП электрических подстанций. Особенностью современных городов является то, что ЭП располагаются непосредственно в местах, где поблизости постоянно находятся люди. Например, вблизи жилых домов либо в самих домах на первом этаже. В рамках проблемы экологической безопасности рассматривается комплекс вопросов относительно определения влияния ВМП на человека и разработки мероприятий и методов его снижения. Население и персонал ЭП по роду своей работы или деятельности вынуждены находиться длительное время в условиях действия этого ВМП. Длительное воздействие ВМП на человека негативно влияет на его психику, приводит к расстройству нервной и сердечнососудистой систем, снижает работоспособность человека [5]. Научные исследования по проблеме ВМП проводятся во всех развитых странах мира, в том числе в Украине, России, странах Европы, США, Японии, Канаде. Для примера, действующие нормы по уровню ВМП частоты сети для разных стран составляют: Украина (государственные санитарные нормы и правила при работе с источниками электромагнитных полей, зарегистрированы в Министерстве юстиции Украины 13 марта в 2003 г. за № 203/7524) – 1750 мкТл; Россия (СанПиН 2.2.4.1191-03 "Электромагнитные поля в производственных условиях"), Европа (Стандарт ICNIRP), Великобритания (стандарт NRPB) – 100 мкТл; Швеция (государственный стандарт MPR 1990:08. Swedish Board for Technical Accreditation) – 0,25 мкТл. В Украине ведется подготовка к введению нормы в 0,5 мкТл.

Резкое снижение нормы ВМП в Украине обусловлено изменением концепции формирования его предельных уровней. Предыдущая концепция строилась исходя из условия снижения ВМП до уровня, при котором наведенные этим полем токи в теле человека не превышают токов неотпускания. В соответствии с новой концепцией ограничение уровня ВМП определяется санитарными нормативами, то есть отсутствием вредного действия поля на клетки и органы человека. В этих условиях изменяется и подход к ЭП как источникам ВМП.

Для решения проблемы электромагнитной совместимости Международная ассоциация защиты от излучения (IRPA/INICR) произвела рекомендации из применения в европейских странах допустимых и предельно допустимых уровней напряженности ВМП в производственных и непроизводственных условиях, на основе которых разрабатываются национальные стандарты. Применяемые в разных странах допустимые уровни ВМП отличаются по величине: 10^{-6} - 10^{-4} Тл (0,8-80 А/м).

Анализ методов и средств снижения ВМП. Первые работы по снижению ВМП ЭО на промышленном уровне связаны с проблемой магнитной защиты кораблей от минного оружия [6]. Основные усилия были направлены на разработку конструктивных и технологических средств снижения ВМП отдельных элементов ЭО. Не углубляясь в тему, можно констатировать ограниченные возможности такого подхода, поскольку технология производства не позволяла обеспечить снижения ВМП ЭО более чем в десять раз без многократного повышения его стоимости. Накопленный в Украине опыт работ из снижения ВМП разнообразного ЭО [7-13] позволили вывести эту проблему на новый уровень и существенно улучшить ситуацию за счет снижения ВМП с помощью параметрических систем автоматической компенсации (САК). Создаваемое ими компенсирующее ВМП приближено по пространственной и временной структуре к ВМП ЭО, но имеет противоположное направление в пространстве. Вследствие этого результирующее ВМП удастся снизить в несколько десятков раз [14]. Разработки охватывают весь спектр ЭО, который используется на ЭП. Похожая САК применена для снижения ВМП ЭП в библиотеке Гетеборга (Швеция) [15]. Эффективность снижения ВМП теоретически достигает 100-300 единиц.

Перспективы использования САК. На практике эффективность снижения ВМП существенно ограничивается и достигает 2-20 единиц, причем это удастся достичь лишь при условии индивидуальной настройки САК ВМП. Такая технология снижения ВМП может быть использована только для отдельных единиц ЭО. Но и в этом случае известные методы и технические решения обеспечивают необходимую компенсацию ВМП только в области внешнего пространства относительно ЭО на расстоянии более трех габаритов [16].

Как показывает анализ, в первую очередь это обусловлено сложной пространственной и временной структурой ВМП ЭО. Эти сложности в полной мере проявляются в том, что математическая модель ЭО существенно усложняется. При использовании этой модели методы определения параметров ЭО по данным расчета и измерения поля также получаются сложными. Выполненные в последнее время исследования [17-23] показали также, что кроме этих сложностей существует ряд особенностей, которые обычно не учитывались в модели поля ЭО. К ним относятся:

- влияние порядка чередования фаз трехфазного ЭО на величину его ВМП (магнитофазный эффект) при прочих равных условиях;
- нелинейные зависимости поля электромагнитов компенсаторов

с ферромагнитным сердечником от токов, обусловленные нелинейными и неоднозначными характеристиками кривой намагничивания и петли гистерезиса материала сердечника;

– зависимость характеристик катушки электромагнита компенсатора магнитного поля от времени при длительном нагреве до установившегося состояния.

Наконец, с увеличением числа параметров существенно усложняются алгоритмы настройки САК.

Учет всех перечисленных параметров и особенностей при снижении ВМП ЭП представляет собой сложную научно-техническую задачу. Ее решение возможно при использовании САК, структура которых должна быть усовершенствована. Эти усовершенствования связаны с учетом следующих дополнений:

– применение алгоритмов с запоминанием параметров при настройке САК;

– учет порядка чередования фаз питания трехфазного ЭО ЭП;

– учет нелинейных зависимостей параметров ЭО и электромагнитов компенсаторов САК от времени работы в одном и том же режиме;

– учет нестационарного характера помех при стендовой настройке параметров САК по данным магнитных измерений;

– применение алгоритмов, которые обеспечивают коррекцию параметров САК в процессе ее работы.

Обобщенная структура параметрической САК с учетом этих дополнений приведена на рис. 1.

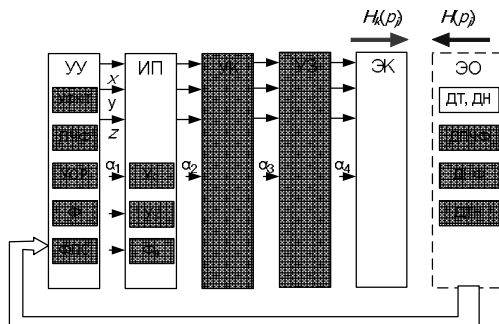


Рис. 1. Обобщенная структура параметрической САК ВМП ЭО.

По сравнению с известной структурой САК [16], новые элементы отмечены затенением. В структуру ЭО введены новые блоки: ДПЧФ –

датчик порядка чередования фаз токов; ДНФ – датчик начальной фазы; ДТН – датчики температуры нагрева. В устройство управления УУ введены новые блоки: УФКТ – устройство формирования контурных токов; ПЧФ – устройство, которое определяет порядок чередования фаз; УОР – устройство ортогонального разложения сигналов датчиков тока ДТ и датчиков напряжения ДН на косинусные и синусные составляющие; Ф – устройство, которое обеспечивает сдвиг фазы относительно базовой (для ЭО с синусоидальными токами); ФЛС – устройство формирования сигналов Fuzzy logic. В ИП введены новые блоки: $У_c$ – усилитель косинусной составляющей тока; $У_s$ – усилитель синусной составляющей тока; $Ф_0$ – устройство, которое обеспечивает формирование синусных и косинусных составляющих токов относительно базовой фазы. В структуру также введено два новых устройства: УК – устройство коррекции входных сигналов электромагнитов компенсаторов; УЗ – устройство запоминания. Параметры регулирования обозначены: α_1 – коэффициенты передачи усилителей токов устройства ИП; α_2 – коэффициенты передачи УК; α_3 – коэффициенты передачи УЗ; α_4 – коэффициенты пропорциональности. Принцип полной компенсации поясняют встречно направленные и равные по величине векторы напряженности $H_k(p_j)$ и $H(p_j)$ ВМП, создаваемого соответственно САК и ЭО.

Приведенная структура САК отображает только общую связь устройств при формировании токов ЭК. Конкретная реализация и выбор блоков осуществляется для каждого вида ЭО отдельно.

Выводы. 1. По результатам анализа состояния проблем экологической безопасности и электромагнитной совместимости на электрических подстанциях установлено, что существующие в Украине существенно выше, чем в развитых странах мира. Для достижения мировых требований необходимо существенное снижение уровня внешнего магнитного поля частоты сети, с 1750 до 0,5 мкТл.

2. Накопленный опыт работ по снижению внешнего магнитного поля корабельного оборудования при решении проблемы магнитной защиты кораблей от минного оружия позволяет использовать как базовые разработки методы и средства снижения поля. Наиболее перспективным является метод автоматической компенсации.

3. Для реализации метода автоматической компенсации при снижении внешнего магнитного поля электрооборудования электрических подстанций предложен ряд усовершенствований структуры параметрических систем автоматической компенсации, направленных на повышение их эффективности. Эти усовершенствования учитывают не-

линейные характеристики электрооборудования и электромагнитов компенсаторов системы компенсации, порядок чередования фаз трехфазного электрооборудования и особенности алгоритмов формирования компенсирующих сигналов в системе компенсации.

Список литературы: 1. *Любимов В.В.* Биотропность естественных и искусственно созданных электромагнитных полей. (Аналитический обзор). Препринт No. 7 (1103). – М.: ИЗМИРАН, 1997. – 85 с. 2. *Холодов Ю.А.* Влияние электромагнитных и магнитных полей на центральную нервную систему. – М.: Наука, 1966. – 283 с. 3. ДСТУ 2465-94. Сумісність технічних засобів електромагнітної стійкості до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги та методи випробувань. Введ. 01.01.95. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 29 с. 4. IEC 1000-4-8: 1993. "Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measuring techniques. – Section 8: Power frequency magnetic field immunity test. Basic EMC Publication". Edition 1.1. – 2001. – 61 p. 5. *Афанасьев А.И., Карпиков И.И.* Методы снижения электрических и магнитных полей промышленной частоты 50 Гц. Справочное руководство. – Фрязино Моск. обл.: ГНПП "Циклон-Тест", 2001. – 47 с. 6. *Григорьев Б.П.* Актуальные проблемы снижения физических полей судов // Труды Международной конференции по судостроению. Секция А. Судовая электродинамика, магнетизм и гидродинамика. – Санкт-Петербург: Изд-во ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1994. – С. 3-7. 7. *Розов В., Волохов С., Луников В. и др.* Технология снижения внешних магнитных полей судового электрооборудования // Труды Второй Международной научно-технической конф. по судостроению (ISC'98). – Том 2. – Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1998. – С. 22-27. 8. *Луников В.С.* Наукові основи технології компенсації магнітного поля поблизу низьковольтних комплектних пристроїв. – Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.09.01 / Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". – Харків, 2003. – 36 с. 9. *Розов В.Ю.* Системы автоматической компенсации внешнего магнитного поля энергонасыщенных объектов. – Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.09.03 / Ин-т электродинамики НАН Украины. – Харьков, 2002. – 37 с. 10. *Ерисов А.В., Луников В.С.* Поле рассеяния силового трансформатора вентильного преобразователя при несимметрии углов включения вентилей. – Тр. Всесоюз. науч. исслед. ин-та электромеханики. Т. 77. Вентильные системы. – М.: ВНИИЭМ, 1985. – С. 116-125. 11. *Луников В.С.* Оптимальное использование методов, применяемых для снижения внешнего магнитного поля электрооборудования // Вісник Східноукраїнського державного університету. – Луганськ: Вид-во СУДУ. – 1999. – №6(22). – С. 113-123. 12. *Луников В.С.* Повышение эффективности методов, применяемых для снижения внешнего магнитного поля электрооборудования // Технічна електродинаміка. – 2000. – №1. – С. 7-13. 13. *Луников В.С., Крюкова Н.В., Гелярская О.А. и др.* Анализ внешнего магнитного поля переменных токов расщепленного шинпровода // Електроінформ. – 2007. – №4. – С. 14-17. 14. *Розов В.Ю.* Анализ эффективности параметрических систем автоматической компенсации внешнего магнитного поля энергонасыщенных объектов

// Техническая электродинамика. – 2002. – №2. – С. 3-10. **15.** *Salinas E.* Field Mitigation from Secondary Substations / Salinas E. // CARIED 2003. 17th International Conference on Electricity Distribution. – Belgium – 15 May 2003. – 32 p. **16.** *Розов В.Ю.* Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения: Препр. / НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 772. – Киев: 1995. – 42 с. **17.** *Лушков В.С., Крюкова Н.В., Гетьман А.В.* и др. Экспериментальное подтверждение магнитофазного эффекта для трехфазного электрооборудования // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – №40. – С. 84-94. **18.** *Варшамова И.С., Лушков В.С.* Перспективы применения методов нечеткой логики в системах автоматической компенсации внешнего магнитного поля электрооборудования // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – №40. – С. 3-10. **19.** *Варшамова И.С., Лушков В.С., Гелярская О.А.* и др. Оценка изменения сопротивления катушки электромагнита компенсатора при длительном нагреве // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 16. – С. 8-15. **20.** *Король Е.Г., Лушков В.С.* Оценка нелинейности характеристик электромагнита для компенсации магнитного момента электрооборудования (Часть 2) // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 16. – С. 44-54. **21.** *Варшамова И.С., Лушков В.С.* Методика оценки сопротивления катушки электромагнита компенсатора магнитного поля при длительном нагреве до установившегося состояния // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2010. – № 36. – С. 27-35. **22.** *Варшамова И.С.* Способ автоматической компенсации внешнего магнитного поля электротехнических устройств с несинусоидальными токами // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2011. – № 12. – С. 17-25. **23.** *Гелярская О.А., Лушков В.С., Варшамова И.С.* и др. Моделирование компенсированного магнитного поля автоматического выключателя // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2011. – № 48. – С. 14-22.

*Поступила в редколлегию 10.12.2011
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*

А.А. ГУК, аспирант, ЗНТУ, Запорожье

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ СИГНАЛА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

В статті розглядається аналіз точності сигналу вимірювальної інформації для автоматичного діагностування на прикладі моделі внутрішніх втрат силового трансформатора у режимі експлуатації.

В статье рассматривается анализ точности сигнала измерительной информации для автоматического диагностирования на примере модели внутренних потерь силового трансформатора в режиме эксплуатации.

Введение. Автоматическое диагностирование – область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов с применением автоматизированных систем, обеспечивающих сбор, хранение и обработку информации в реальном времени.

Актуальность применения и использования автоматического диагностирования при построении современных высоковольтных машин и аппаратов декларируется крупнейшими мировыми энергокомпаниями (ОАО "ФСК ЕЭС", Россия; Terna Spa, Италия; PowerGrid Corporation, Индия; Red Electrica Corporation, Испания; СТЕЕР, Бразилия), обсуждается на международных трансформаторных комитетах (сессиях) в т.ч. МЭК, SIGRE, ТРАВЕК, включающих более 40 национальных комитетов, представляющих 80% населения Земли, которые потребляют более 95% электроэнергии, производимой в мире.

1. Анализ развития системы автоматического диагностирования

Проанализируем развитие системы автоматического диагностирования на примере одной из самых крупных электросетевых компаний в мире – ОАО "ФСК ЕЭС".

По данным годового отчета ОАО "ФСК ЕЭС" за 2010г, можно определить следующие эксплуатационные характеристики:

- количество силовых (авто) трансформаторов (далее – ТР) класса напряжения 220-750 кВ: 2129 ед., суммарной трансформаторной мощностью 299 837 МВА, среди них 63% со сроком эксплуатации 25 лет и выше;

- количество шунтирующих реакторов (далее – ШР) класса напряжения 110-750кВ 404 ед., суммарной реактивной мощностью

27 898 МВАр среди них 24% со сроком эксплуатации 25 лет и выше.

Общее количество силового оборудования, оснащенного средствами автоматической диагностики составляет 314 ед. (ТР – 220 ед., ШР–94 ед.), суммарной установленной мощностью 43 936 МВА и 7 234 МВАр соответственно.

Программным документом, регламентирующим техническую политику ОАО "ФСК ЕЭС", является Положение о технической политике ОАО "ФСК ЕЭС" (далее – ПТП), утвержденное Советом директоров ОАО "ФСК ЕЭС" 8 февраля 2011 года. В соответствии с ПТП, в области технической диагностики на вновь строящихся и реконструируемых ПС должно применяться электрооборудование в конструктивном исполнении, обеспечивающем возможность организации мониторинга технического состояния под рабочим напряжением.

На основании плана ввода трансформаторной мощности (инвестиционная программа ОАО "ФСК ЕЭС" на 2010-2014гг.) ежегодно в ОАО "ФСК ЕЭС" планируется к вводу в эксплуатацию ~ 17,8 ГВА, что может составлять 60-90 ед. силового оборудования 110 кВ и выше в зависимости от установленной мощности.

Основные нормативные документы, определяющие требования к развитию систем автоматической диагностики ОАО "ФСК ЕЭС" (далее – Документы):

- СО 34.46.305-2005: Инструкция по применению системы мониторинга при изготовлении и ремонте силовых трансформаторов;

- Общие технические требования к системам мониторинга, управления и диагностики трансформаторов (автотрансформаторов) и шунтирующих реакторов, в редакции 2005г;

- СТО 56947007-29.200.10.011-2008: Системы мониторинга силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Общие технические требования. (Приказ ОАО "ФСК ЕЭС" от 18.04.2008 №140);

- Распоряжение ОАО "ФСК ЕЭС" от 02.08.2011 № 538р "Об утверждении технических требований ОАО "ФСК ЕЭС" к системам автоматической диагностики силового оборудования (автотрансформаторы, трансформаторы и шунтирующие реакторы) при его первичном вводе в эксплуатацию".

Перечисленные Документы формулируют требования к построению системы автоматической диагностики, к эксплуатационной надежности и контролируемым параметрам, а также к математическим моделям, основные из которых расчеты:

- временных превышений напряжения на стороне ВН;
- температуры наиболее нагретой точки обмотки;
- содержания влаги в изоляции. Температуры образования пу-

зырьков пара;

- старения главной изоляции;
- оценки состояние и эффективность системы охлаждения;
- оценка состояния основной изоляции высоковольтных вводов;
- оценки состояния устройства регулирования под напряжением;
- нагрузочной способности трансформатора;
- внутренних потерь активной части трансформатора.

При этом в Документах не описаны требования:

– к порядку использования результатов автоматического диагностирования;

– к первичным датчика, местам их установки, измерительным устройствам и точности сигнала измерительной информации.

Это значит, что, не имея достаточной точности сигнала измерительной информации, результат диагностирования не может считаться достоверным.

2. Анализ точности сигнала измерительной информации

Класс точности – основная метрологическая характеристика прибора, определяющая допустимые значения основных и дополнительных погрешностей, влияющих на точность измерения.

Общие требования к классам точности средств измерений определены ГОСТ 8.401-80.

Следует отметить, что аппараты с классом точности 0,5 (0,2) начинают работать в классе от 5 % загрузки, а 0,5s (0,2s) уже с 1 % загрузки.

Проанализируем точность сигнала измерительной информации для автоматического диагностирования на приме модели расчета параметра сопротивления короткого замыкания (Z_k) и внутренних потерь в трансформаторе в режиме (on-line).

2.1. Исходные данные

2.1.1. Рассмотрим приведенный трансформатор с напряжением КЗ $U_k = 10\%$ (паспортные данные). Для упрощения выкладок исключим эквивалентное сопротивление магнитной системы.

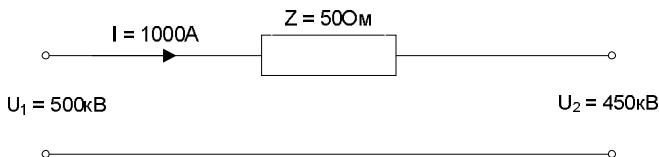


Рис. 1. Схема замещения приведенного трансформатора.

1.2. Параметры измерительных трансформаторов:

– ТН ($U_n = 500000\text{В}$, класс точности – 0,5);

– ТТ ($I_n = 1000\text{А}$, класс точности – 0,2S).

2.2. Расчет полного сопротивления к.з. обмоток (Z_k) для определения деформации обмоток в режиме on-line по измеренным напряжениям и току.

К числу опасных дефектов относятся осевые смещения отдельных катушек и радиальные их деформации. Более 80% повреждений мощных трансформаторов при коротких замыканиях связано с потерей радиальной устойчивости обмоток. Основным параметром, характеризующим деформацию обмоток, является сопротивление КЗ трансформатора Z_k . По изменению Z_k можно определить степень деформации обмоток. Периодическое измерение позволит своевременно выявить повреждение трансформатора и вывести его в ремонт.

2.2.1. Расчет сопротивления по измеренным напряжениям и току:

$$Z = \frac{U_1 - U_2}{I} = \frac{500000 - 450000}{1000} = 50 \text{ Ом}.$$

2.2.2 Среднее значение сопротивления:

$$\langle Z \rangle = \frac{\langle U_1 \rangle - \langle U_2 \rangle}{\langle I_1 \rangle}.$$

2.2.3. Расчет полуширины доверительного интервала измерительных трансформаторов:

$$\text{– ТН: } \Delta U = U_n \cdot \frac{\text{класс точности}}{100} = 500000 \cdot \frac{0,5}{100} = 2500\text{В};$$

$$\text{– ТТ: } \Delta I = I_n \cdot \frac{\text{класс точности}}{100} = 1000 \cdot \frac{0,2}{100} = 2\text{А}.$$

2.2.4. Таким образом, точность прямых измерений напряжений и тока составляет:

$$U_1 = (500000 \pm 2500)\text{В};$$

$$U_2 = (450000 \pm 2500)\text{В};$$

$$I_1 = (1000 \pm 2)\text{А}.$$

2.2.5. Определим частные производные и их значения при средних значениях аргументов:

$$\frac{\partial Z}{\partial U_1} = \frac{1}{I_1} = \frac{1}{1000} = 10^{-3};$$

$$\frac{\partial Z}{\partial U_2} = -\frac{1}{I_1} = -\frac{1}{1000} = -10^{-3};$$

$$\frac{\partial Z}{\partial I_1} = -(U_1 - U_2) \frac{1}{I_1^2} = -\frac{50000}{1000^2} = -0,05.$$

2.2.6. Вычислим составляющие погрешности от каждого аргумента:

$$\Delta Z_{U1} = \Delta U \cdot \frac{\partial Z}{\partial U_1} = 2500 \cdot 10^{-3} = 2,5;$$

$$\Delta Z_{U2} = \Delta U \cdot \frac{\partial Z}{\partial U_2} = -2500 \cdot 10^{-3} = -2,5;$$

$$\Delta Z_{I1} = \Delta I \cdot \frac{\partial Z}{\partial I_1} = -2 \cdot 0,05 = -0,1.$$

2.2.7. Абсолютная погрешность расчета сопротивления по измеренным напряжениям и току составит:

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \sqrt{(\Delta Z_{U1})^2 + (\Delta Z_{U2})^2 + (\Delta Z_{I1})^2} = \\ &= \sqrt{(2,5)^2 + (-2,5)^2 + (-0,1)^2} = 3,537. \end{aligned}$$

2.2.8. Относительная погрешность расчета сопротивления по измеренным напряжениям и току составит:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{3,537}{50} \cdot 100\% = 7,074\%.$$

2.3. Проверим расчет внутренних потерь в трансформаторе в режиме on-line по мощности трансформатора

2.3.1. Определим мощность трансформатора:

$$S = U_1 \cdot I_1 - U_2 \cdot I_1 = (U_1 - U_2) \cdot I_1 = 50000 \cdot 1000 = 50000 \text{ кВА}.$$

2.3.2. Среднее значение мощности:

$$\langle S \rangle = (\langle U_1 \rangle - \langle U_2 \rangle) \cdot \langle I_1 \rangle.$$

2.3.3. Определим частные производные и их значения при средних значениях аргументов:

$$\frac{\partial S}{\partial U_1} = I_2 = 1000;$$

$$\frac{\partial S}{\partial U_2} = -I_2 = -1000;$$

$$\frac{\partial S}{\partial I_1} = -(U_1 - U_2) = 50000.$$

2.3.4. Вычислим составляющие погрешности от каждого аргумента:

$$\Delta S_{U1} = \Delta_U \cdot \frac{\partial S}{\partial U_1} = 2500 \cdot 1000 = 2,5 \cdot 10^6;$$

$$\Delta S_{U2} = \Delta_U \cdot \frac{\partial S}{\partial U_2} = -2500 \cdot 1000 = -2,5 \cdot 10^6;$$

$$\Delta S_{I1} = \Delta_I \cdot \frac{\partial S}{\partial I_1} = 2 \cdot 50000 = 10^5.$$

2.3.5. Абсолютная погрешность составляет:

$$\begin{aligned} \Delta S &= \sqrt{(\Delta S_{U1})^2 + (\Delta S_{U2})^2 + (\Delta S_{I1})^2} = \\ &= \sqrt{(2,5 \cdot 10^6)^2 + (-2,5 \cdot 10^6)^2 + (10^5)^2} = 3,537 \cdot 10^6. \end{aligned}$$

2.3.6. Относительная погрешность расчета внутренних потерь в трансформаторе составляет:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{3,537}{50} \cdot 100\% = 7,074\%.$$

Выводы:

1. Относительная погрешность определения сопротивления Z_k по измеренным напряжениям и току составляет 7,074 %.

Относительная погрешность определения мощности также составляет 7,074 %.

Данная погрешность получена с учетом классов точности только первичных преобразователей на класс точности ТН – 0,5 и ТТ – 0,2. Если учесть еще погрешность измерительных приборов, и попытаться определить влияние токов намагничивания, то погрешность измерения будет еще больше.

2. В целях определения деформации обмоток, для диагностирования необходимо знать изменение Z_k даже на 1 % т.к. важно установить именно начальные деформации обмоток, чтобы своевременно предотвратить аварийный выход трансформатора из строя с разрушениями, значительно удорожающими ремонт и затрудняющими определение причины аварии. Значение $\Delta Z_k \geq 3$ % указывает на наличие в обмотках недопустимых деформаций.

3. В соответствии с заводскими протоколами испытаний на нагрев, внутренние потери трансформатора (сумма потерь к.з. и потерь х.х.) составляют:

– для трансформаторов мощностью 50÷100 МВА: (0,4 ÷ 0,5) % от полной мощности;

- для трансформаторов мощностью 100÷300 МВА: $(0,3 \div 0,4) \%$ от полной мощности;
- для трансформаторов мощностью 300÷500 МВА: $(0,2 \div 0,3) \%$ от полной мощности;
- для трансформаторов мощностью 500 МВА и более: $(0,1 \div 0,2) \%$ от полной мощности.

4. Таким образом, класса точности измерительных трансформаторов (ТН – 0,5; ТТ – 0,2 S) недостаточно для реализации методики определения внутренних потерь в трансформаторе в режиме on-line.

Список литературы: 1. *Свирен П.М.* Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с. 2. Эксплуатационный формуляр Ц-02-88(Э). Об измерениях сопротивления КЗ трансформаторов. – 1987. – 10 с. 3. *Соколов В.В., Цурпал С.В., Конов Ю.С., Короленко В.В.* Определение деформаций обмоток крупных силовых трансформаторов // Электрические станции, 1988. – №6. – С. 52-56. 4. *Голоднов Ю.М.* Контроль за состоянием трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 88 с. 5. Справочная книга / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с. 6. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования / Под ред. Ф.Л. Когана. – М.: АО "Фирма ОРГРЭС", 1998. 7. Типовая технологическая инструкция. Трансформаторы классов напряжения 110–1150 кВ мощностью 80 МВ·А и более. Капитальный ремонт. СО 34.46.605-2005. – М., 2005. 8. ГОСТ 8.401-80 Классы точности средств измерений. 9. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения. 10. Годовой отчет ОАО "ФСК ЕЭС" за 2010г (www.fsk-ees.ru). 11. Положение "О технической политики ОАО "ФСК ЕЭС" от 08.02.2011(www.fsk-ees.ru). 12. Технические требования к системам автоматической диагностики силового оборудования (автотрансформаторы, трансформаторы и шунтирующие реакторы) при его первичном вводе в эксплуатацию (Распоряжение ОАО ФСК от 02.08.2011 №538р). 13. СТО 56947007-29.200.10.011-2008. Системы мониторинга силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Общие технические требования (Приказ ОАО "ФСК ЕЭС" от 18.04.2008 №140). 14. СО 34.46.305-2005: Инструкция по применению системы мониторинга при изготовлении и ремонте силовых трансформаторов, утв. 01.02.2005 г. ОАО РАО "ЕЭС России".

*Поступила в редколлегию 4.11.2011
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*

О.С. КРУГОВА, студент, НТУ "ХПІ", Харків

Ю.С. ГРИЩУК, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Харків

АВТОМАТИЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОКОНВЕКТОРІВ

Розроблена структурна схема для автоматизації дослідження електроконвекторів. Вибраний базовий мікроконтролер для проведення досліджень. Розроблений алгоритм роботи схеми для дослідження режимів роботи електроконвектора.

Разработана структурная схема для автоматизации исследования электроконвекторов. Выбран базовый микроконтроллер для проведения исследований. Разработан алгоритм работы схемы для исследования режимов работы электроконвектора.

Вступ. Опалення приміщень в холодні пори року є доволі важливим питанням як з економічного боку, так і з боку безпеки кінцевого споживача.

Одним з приладів для обігріву помешкань є електроконвектор, що призначений для нагрівання навколишнього повітря шляхом природної конвекції. Надійність цього пристрою є доволі важливою, так як від неї залежить працездатність нагрівального елемента, від роботи якого може залежати не тільки виконання певної роботи, але і людське життя.

Метою даної роботи є проведення огляду і аналізу існуючих конструкцій побутових електроконвекторів та проведення розрахунку нагрівного елемента з метою проектування та розробки електроконвектора з покращеними технічними характеристиками.

Структурна схема. Покращення надійності побутового електроконвектора потребує дослідження параметрів роботи нагрівальних елементів, що входять до його складу. Автоматизація досліджень електроконвекторів може бути виконана за допомогою стенду, розробленого на базі сучасного мікроконтролера (МК). Результати таких досліджень дозволять підібрати оптимальні параметри нагрівальних елементів та електроконвекторів, виконати контроль їх параметрів та провести серію дослідів, максимально наближених до реальних умов їх використання.

Для автоматизації досліджень електроконвекторів та інших нагрівальних приладів пропонується структурна схема на базі мікроконтролера КМ 1816BE51, яка зображена на рис.1. Восьмирозрядний високо-

[illegible]

- датчики контрольованих параметрів (температури нагрівного елемента, температури корпусу, температури приміщення) Д1–Д3;

- Через послідовний інтерфейс RS232C стенд пов'язаний з ПЕВМ, яка може змінювати режими випробувань або досліджень, а також

приймати, запам'ятовувати, відображати і документувати результати випробувань або досліджень.

До досліджуваного об'єкту підключені відповідні датчики. Датчики контрольованих параметрів Д1–Д3 є перетворювачами температури нагрівного елементу, температури корпусу і температури приміщення в напругу. Нормуючі підсилювачі погоджують вихідну напругу датчиків з необхідним вхідним сигналом АЦП 0–10 В і забезпечують низький вихідний опір.

Комутатор аналогових сигналів перемикає один з входів на вихід залежно від керуючого коду, що поступив від мікроконтролера.

АЦП є швидкодіючим десятирозрядним перетворювачем вхідної напруги в паралельний двійковий код. Запуск перетворювача проводиться мікроконтролером, закінчення перетворення викликає сигнал готовності, який є командою для зчитування даних.

Мікроконтролер, відповідно до заданої програми, управляє процесом досліджень або випробувань шляхом іздаваною періодичністю датчиків Д1–Д3 відповідно до алгоритму управління. Вихідні сигнали датчиків унаслідок їх різної фізичної природи можуть потребувати посилення і проміжного перетворення на АЦП або схемах формувачів сигналів, які найчастіше виконують функції гальванічної розв'язки і формування рівнів двійкових сигналів стандарту ТТЛ. Компаратори К1–К3 є паралельним апаратним контуром для захисту від аварійних режимів. ПУО1–ПУО3 є підсилювачами потужності, які управляють виконавчими пристроями силової установки.

У якості датчиків температури можуть використовуватися термопари. Наприклад, хромель-алюмельові термопари, які відрізняються невисокою вартістю, призначені для вимірювання температури в діапазоні від -270°C до $+1372^{\circ}\text{C}$. Чутливість цих термопар складає $41\text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$.

Алгоритм роботи. Блок-схема алгоритму наведено на рис. 2. Для проведення досліджень на початку приводимо стенд у початковий стан. Далі занулюємо лічильник номеру датчика. Підключаємо датчик температури нагрівного елемента. Вмикаємо аналоговий комутатор.

Далі на АЦП подається сигнал запуску, після зчитування і перетворення сигналу датчика, АЦП посилає сигнал готовності на мікроконтролер. Дані прийняті з датчика видаються зовнішньому пристрою через універсальний асинхронний приймач-передавач (УАПП) персональному комп'ютеру для подальшого зберігання та обробки.

Після цього програма аналогічно тому, як знімалися дані з датчика температури нагрівного елемента, зчитує дані з датчиків температури корпусу і приміщення.

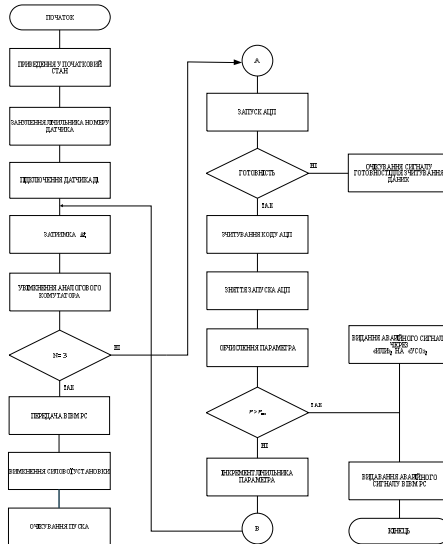


Рис. 2. Алгоритм роботи схеми автоматизації керування дослідженнями режимів роботи електроконвектора.

Висновок. Розроблена структурна схема і алгоритм дозволяють автоматизувати керування процесом випробувань і досліджень електроконвекторів, суттєво скоротити терміни і витрати на їх проведення, підвищити точність отримуваних результатів та проводити їх подальшу комп'ютерну обробку і документування.

Список літератури: 1. Гришук Ю.С. Мікропроцесорні пристрої: Навчальний посібник. – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – 348 с. 2. Сташин В.В., Урусов А.В., Мологонцева О.Ф. Проектирование цифровых устройств на однокристальных микроконтроллерах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 224 с. 3. Башков Е.А. Аппаратное и программное обеспечение зарубежных микроЭВМ. – К.: Высшая шк., 1990. – 207 с. 4. Боборыкин А.В., Липовецкий Г.П., Литвинский Г.В., и др. Однокристальные микроЭВМ. Справочник. – М.: МИКАП, 1994. – 400 с. 5. Щелкунов Н.Н., Дианов А.П. Микропроцессорные средства и системы. – М.: Радио и связь, 1989. – 189 с. 6. Ахметов Р.Р., Бакин А.Д., Кабанов Н.Д. Однокристальные промышленные микроконтроллеры // Мир ПК. – 1993. – № 10. – с. 31-37.

Поступила в редколлегию 22.11.2011
Рецензент д.т.н., проф. Лупіков В.С.

Р.О. МАЗМАНЯН, канд. техн. наук, с.н.с., ІЕД НАН України,
Київ

СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ С ГИРАТОРОМ И SPICE- МАКРОМОДЕЛИ ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ХОЛЛА

В статті описані нові феноменологічні еквівалентні схеми перетворювачів Хола зі структурним розподілом властивостей постійності та мінливості, що засновані на сполученні гіраторів та реверсивних неавтономних чотириполосників. Наведено поведінкові рівняння електричних ланцюгів, що моделюють первинні та вторинні ефекти Хола, макромоделі та їх тестування.

В статье описаны новые феноменологические эквивалентные схемы преобразователей Холла со структурным разделением свойств постоянства и изменчивости, основанные на соединении гиаторов и реверсивных четырехполосников. Приведены уравнения, моделирующие первичные и вторичные эффекты Холла, макромодели и результаты их тестирования.

Введение. Датчики Холла представляют собой различной формы и размеров полупроводниковые пластины, эпитаксиальные слои или области диффузии примесей на кремниевых подложках с двумя парами ортогонально расположенных выводов. Эти гальваномагнитные преобразователи непосредственно преобразуют магнитную индукцию в напряжение V_H между парой выводов на противоположных сторонах пластины, когда через другую пару выводов проходит управляющий ток I_c . Для прямоугольной изотропной пластины из полупроводникового материала это напряжение пропорционально произведению управляющего тока, индукции магнитного поля B и косинуса угла Θ между вектором $\mathbf{B}$ и нормалью к плоскости датчика Холла, т.е.

$$V_H = R_H \cdot \frac{I_c \cdot B}{d} \cdot \varphi(l, b, B) \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

где R_H – коэффициент Холла для ненагруженного преобразователя; l , b , d – длина, ширина и толщина пластины, соответственно; $\varphi(l, b, d)$ – зависимость напряжения Холла от соотношения размеров пластины и электродов [1–3].

Формализация датчика Холла в виде компьютерной модели [4–6] позволяет проводить вычислительные эксперименты для определения свойств измерительных цепей, включающих такие преобразователи

информации. Безусловно, модели отражают не все возможные характеристики конкретных датчиков. Практическая ценность моделей определяется не только полнотой их соответствия исследуемым объектам, но и требуемым объемом физических экспериментов с конкретным датчиком для настройки необходимых параметров модели, средствами формализации описания характеристик преобразователя, возможностью их адаптации к конкретным условиям.

Феноменологические модели [1, 7–9] используют в качестве алгоритмической основы схемы замещения, в которых физические процессы в преобразователе Холла представлены соединением стандартных элементов, отражающих – с определенным приближением – совокупность свойств конкретного датчика. Несмотря на то, что феноменологическая модель в соединении с гиратором наиболее полно отражает основные свойства преобразователя Холла [1, 10], компьютерные модели, реализующие такую схему замещения, разработаны недостаточно.

Целью представленной работы являлось создание новых моделей гальваномагнитных преобразователей на основе эффекта Холла для компьютерного моделирования высокоточных магнитоизмерительных систем.

Универсальность и гибкость стандарта *SPICE* не исключают необходимости использования особых методов моделирования магнитоизмерительных преобразователей. Отсутствие магнитных величин в этом стандарте приводит к необходимости их аналогового представления в виде электрического тока или напряжения. Поэтому макромодели преобразователей магнитных величин должны включать в виде составляющих также и конверторы, преобразующие магнитные величины в электрический сигнал [7, 11].

Схемы замещения гальваномагнитных преобразователей с проходным четырехполюсником. Использование в качестве схемы замещения датчика Холла проходного четырехполюсника [1, 12] основано на прямом соответствии моделируемых свойств физическим процессам и позволяет с помощью простых и ограниченных средств решать в процессе синтеза модели и дальнейшей ее адаптации для конкретных приложений следующие задачи:

- конвертирование магнитных величин в электрические;
- представление электрических свойств собственно конструкции преобразователя и ее материала;
- экспериментальное определение исходных параметров модели.

В основе такого подхода положено преобразование эквивалентного четырехполюсника в подструктуры, раздельно отражающие свой-

ства постоянства и изменчивости преобразователя в пределах принятых ранее допущений. Соотношения между гармоническими напряжениями и токами на входе и выходе эквивалентного четырехполюсника описываются уравнениями в матричной форме [1,13,14]:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = \mathbf{Z} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix}$; $Z_{11} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}$, $Z_{12} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2}$, $Z_{21} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}$, $Z_{22} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2}$ –

комплексные сопротивления.

Преобразуем четырехполюсник схемы замещения (рис. 1,а) в последовательное соединение двух четырехполюсников, как это показано на рис. 1,б. Это преобразование расщепляет матрицу $\mathbf{Z}$ выражения (2) [12]:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = (\mathbf{Z}_a + \mathbf{Z}_b) \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\mathbf{Z}_a = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, $\mathbf{Z}_b = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix}$.

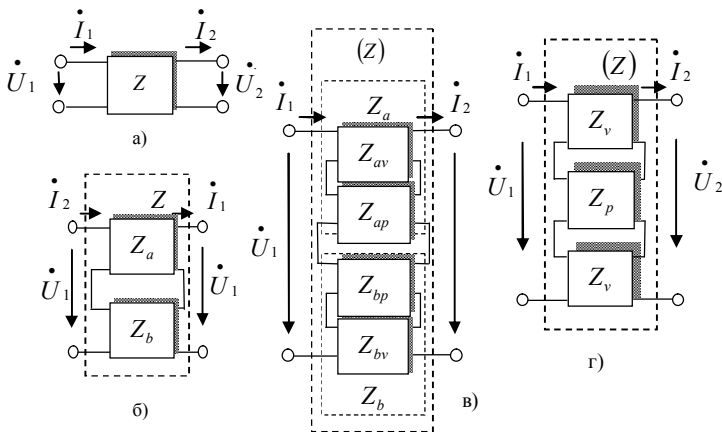


Рис. 1. Преобразование схемы замещения четырехполюсника.

В преобразованной схеме замещения входной ток является общим для последовательно соединенных четырехполюсников, что соответствует ортогональному расположению выводов датчика на основе эффекта Холла.

Каждый из четырехполюсников Z_a , Z_b , в свою очередь, может быть разделен на подструктуры, раздельно описывающие свойства постоянства и изменчивости преобразователя (рис. 1,в).

Теперь соотношения между входными напряжениями и токами схемы замещения описываются следующими равенствами:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = \left[(\mathbf{Z}_{ap} + \mathbf{Z}_{av}) + (\mathbf{Z}_{bp} + \mathbf{Z}_{bv}) \right] \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Каждая из сумм матриц $\mathbf{Z}_{ap} + \mathbf{Z}_{av}$, $\mathbf{Z}_{bp} + \mathbf{Z}_{bv}$ представляет структурное разделение свойств постоянства и изменчивости. Дальнейшие преобразования завершают структурирование схемы замещения объединением четырехполюсников, представляющих постоянство преобразователя, и отождествлением конверторов магнитного поля в напряжение – BV -конверторов (рис. 1,г):

$$\mathbf{Z}_p = \mathbf{Z}_{ap} + \mathbf{Z}_{bp}, \quad \mathbf{Z}_v = \mathbf{Z}_{av} = \mathbf{Z}_{bv}. \quad (5)$$

Рассмотрим, каким образом происходит преобразование сигнала в разделенной структуре. Представим BV -конвертор в виде четырехполюсника с активными элементами, входной ток которого $\dot{I}_1 = \dot{I}_c$, а выходной ток $\dot{I}_2$ в нагрузку вызван напряжением Холла $\dot{U}_2 = \dot{V}_H$ (рис. 1,в) [12]. Входной и выходной токи определяются из уравнений:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_1}{2 \cdot \mathbf{Z}_v}; \quad \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{2 \cdot \mathbf{Z}_v}. \quad (6)$$

Тогда связь между токами и напряжениями на входе и выходе четырехполюсника записывается уравнением:

$$\dot{U}_1 \cdot \dot{I}_1 - \dot{U}_2 \cdot \dot{I}_2 = 0. \quad (7)$$

Уравнение (7) указывает на отсутствие потерь в четырехполюснике, т.е. на реактивный характер $\mathbf{Z}_v$. Принимая во внимание направление токов $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$, уравнение четырехполюсника в матричной форме запишется следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\dot{I}_2 \cdot 2Z_v \\ \dot{I}_1 \cdot 2Z_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -2Z_v \\ 2Z_v & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Линейное приближение для напряжения Холла $\dot{U}_2$ в зависимости от индукции магнитного поля B для угла $\theta = 90^\circ$ равно [1]

$$\dot{U}_2 = S_{y0}^I \cdot I_c \cdot B, \quad (9)$$

где $S_{y0}^I = V_H / B \cdot I_c$ – статическая удельная чувствительность преобразователя Холла.

Тогда значение комплексного сопротивления части эквивалентной схемы, соответствующей преобразовательным свойствам датчика Холла, может быть получено из (6) и (9)

$$Z_v = \frac{1}{2} \cdot S_{y0}^I \cdot B. \quad (10)$$

Передаточные сопротивления четырехполюсника одинаковы по величине и противоположны по знаку:

$$\dot{U}_1 / \dot{I}_2 = -2Z_b \quad \dot{U}_2 / \dot{I}_1 = -2Z_b, \quad (11)$$

что свидетельствует о необратимости четырехполюсника Z_v . Это свойство вместе с матрицей комплексного сопротивления из (8) определяют четырехполюсник, представляющий BV -конвертор, как идеальный гиратор [10,22], сопротивление гирации которого определяется выражением (10).

Другая часть эквивалентной схемы в виде неавтономного обратимого четырехполюсника с комплексным сопротивлением Z_p отражающая свойство постоянства датчика, может быть представлена в виде различных схем внутренних соединений [1, 11, 18, 19].

Гираторы в SPICE-моделях датчиков Холла. Перейдем к синтезу идеального гиратора для *SPICE*-моделирования преобразователей Холла на основе управляемых источников [15]. Матрица сопротивлений из (8) представляется в виде суммы двух матриц

$$\begin{pmatrix} 0 & -2Z_v \\ 2Z_v & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -2Z_v \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 2Z_v & 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Сумма матриц соответствует сложному четырехполюснику, образованному встречно-последовательным соединением двух источников

напряжения H_1 , H_2 , управляемых ток (ИНУТ) [7, 10]. Моделирующая схема подобной реализации идеального гиратора показана на рис. 2, а.

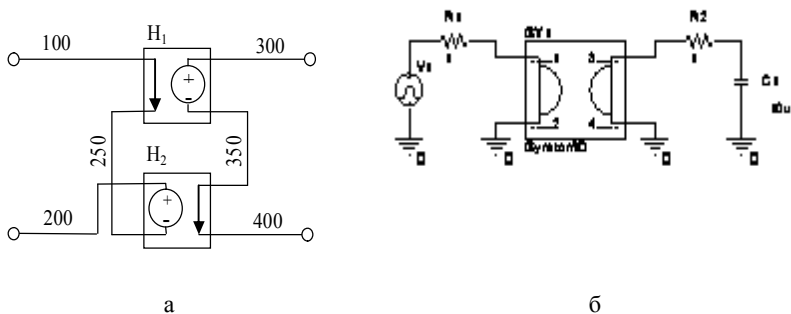


Рис. 2. Схемы идеального гиратора.

Собственно идеальный гиратор для *SPICE*-моделирования и схема его тестирования, включающая источник тестовых сигналов V_1 , присоединенный через сопротивление R_1 к паре зажимов гиратора, показаны на рис. 2, б. К другой паре зажимов гиратора подключена цепочка R_2C_1 .

Скрипт макромодели идеального гиратора составлен по моделирующей схеме для $Z_b=10$ Ом:

```
.SUBCKT Gyrator/ID 100 200 300 400
*
H1      300 350 V1 10 V1 100 250 0V
H2      200 250 V2 10 V2 350 400 0V
*
.ENDS
```

Полнофункциональный BV-конвертор должен обеспечивать управляемое изменение сопротивления гирации в соответствии с выражением (10). Реализация такого гиратора возможна с помощью двух перемножителей напряжения E_1 , E_2 , включенных последовательно с каждым ИНУТ H_1 , H_2 идеального гиратора. Схема гиратора с сопротивлением, управляемым напряжением, показана на рис. 3, а. В этом многополюснике управляющими являются выводы 5 и 6.

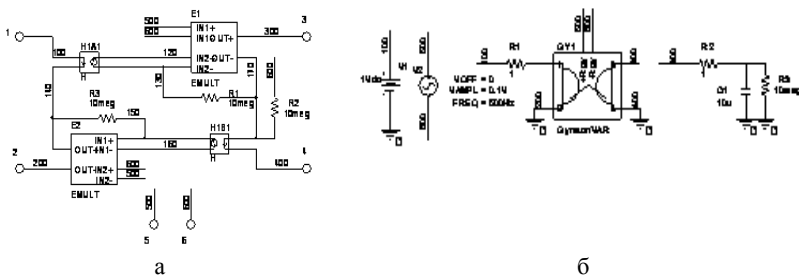


Рис. 3. Схемы гиратора с резистором.

Скрипт макромодели по этой схеме имеет вид [12]:

```
.SUBCKT Gyrator/VAR 100 200 300 400 500 600
*
H1      120 130 VI
VI      10  100 140 0V}
H2      150 160 V2 10
V2      170 400  0V
E1      300 170 VALUE {V (500, 600) t V (120, 130)}
E2      140 200 VALUE {V (150, 160) * V (600, 500)}
*
R1      130 170 10 meg
R2      170 600 10 meg
R3      140 150 10 meg
.ENS
```

Управляемый гиратор как компонент *SPICE* и схема его тестирования показаны на рис. 3,б.

Макромодели гальваномагнитных преобразователей Холла. Вторую часть эквивалентной схемы (рис. 1,г) с комплексным сопротивлением Z_p , представим в виде Т-образного четырехполюсника, как это предложено в работе [1]. Моделирующая схема для макромодели преобразователя Холла (рис. 1,г) вырождается, сохраняя при этом только один из гираторов [12]. Схема тестирования модели для частного случая – статического режима – показана на рис. 4.а, где Z_1 , Z_2 , Z_3 имеют только ненулевые активные составляющие R_2 , R_3 , R_4 .

Особенностью рассмотренной модели является отсутствие "вертикальной" симметрии структуры, что не поддерживает эмуляцию преобразователя в режиме дифференциального измерительного сигнала.

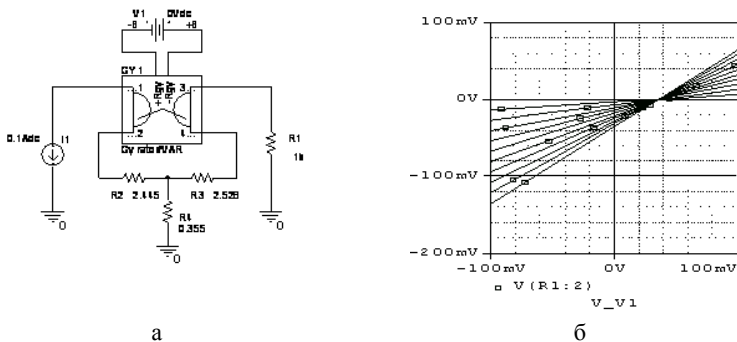


Рис. 4. Схема (а) и статические характеристики (б) преобразователя Холла.

Здесь статическая удельная чувствительность S_{y0}^I преобразователя Холла в (9) относится к униполярному измерительному сигналу.

Семейство статических характеристик (рис. 4.б) получено для управляющих токов преобразователя Холла, изменяющихся в пределах 0,01...0,1 А с шагом 0,01 А. Индукция поля моделируется свипированием напряжения источника V_I в пределах $-0,1...0,1$ В.

В такой структуре не может быть воспроизведено, например, остаточное напряжение на измерительных выводах датчика, вызванное их неэквипотенциальным расположением на пластине преобразователя. Действительно, моделирующая схема и статические характеристики, рис. 4.а и рис. 4.б, соответственно, представляют значения измерительного сигнала на одном из холловских выводов преобразователя, относительно вывода, к которому подключен источник управляющего тока. Рассмотренная модель имеет ограниченное применение [1, 12] и не может быть использована, например, для структурного и схемотехнического моделирования измерителей индукции магнитного поля с коммутируемыми выводами [17-19].

Четырехполусник с матрицей комплексных коэффициентов Z_p , в эквивалентной схеме с дифференциальным сигналом может быть реализован в виде такого звена или соединения звеньев, которое было бы симметричным для пары входных или выходных зажимов (рис. 1,в). Выражение (2) для такой схемы примет вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = Z \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = (Z_v + Z_p + Z_v) \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

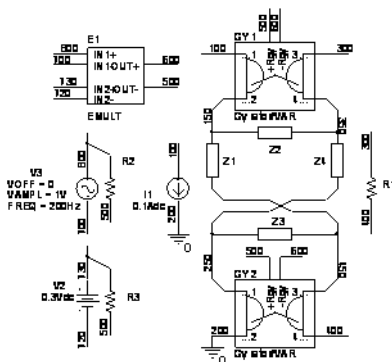


Рис. 5. Схема для макромодели преобразователя Холла.

Представляется возможным использовать для включения в эквивалентную схему преобразователя и экспериментального определения параметров элементов этого звена полный четырехугольник [23], или мост [12, 23, 24]. Моделирующая схема с симметричным мостовым четырехполусником для макромодели преобразователя Холла с дифференциальным измерительным сигналом показана на рис. 5.

Симметричная относительно выводов 100, 200 и 300, 400 и зажимов каждой из этих пар моделирующая схема образована последовательным соединением идеальных гираторов $GY1$, $GY2$ с регулируемым коэффициентом гирации и мостовой схемы, образованной комплексными сопротивлениями $Z1...Z4$. Статическая удельная чувствительность S_{y0}^I преобразователя Холла задается источником постоянного напряжения $V2$.

Формирование управляющего сопротивлением гирации напряжения в соответствии с (6) из напряжений источника $V2$ и источника $V3$, моделирующего индукцию магнитного поля, осуществляется аналоговым множителем $E1$. Здесь BV -конвертор имеет коэффициент преобразования, равный $1/V/T$.

Скрипт макромодели по эквивалентной схеме, включающей мост и два идеальных гиратора (рис. 5), приведен ниже.

Hall Effect Sensor macromodel

*Equivalent network < Gyrator-Bridge-Gyrator >

.PARAM r1 = 1 r2 = 1 r3 = 1 r4 = 1 Sib = 0,3V

Pair with pin 2

| Pair with pin 1

| | Pair with pin 4

| | | Pair with pin 3

| | | |Mag.induc.+B

| | | |Mag.induc.-B

| | | |

.SUBCKT Hall/2GY_BR 1 2 3 4 5 6 7 8

```

R9      5 8 10meg
E5      70 2 VALUE (V(80,85)*V(6,5))
E3      15 40 VALUE {V(25,30)*V(6,5))
H3      60 65 V3 1
V3      50 70 0V
RIO     5 95 10meg
R12     80 1 10rneg
R6      1 5 10meg
E4      55 75 VALUE {V(6,5)} *V(60,65))
E2      56 VALUE {V(8,7)*V(95,90)}
R7      1 20 10meg
H4      80 85 V4 1
V4      75 4 0V
*Sensitivity S[V/(T*A)]—>x.xV
VS      95 90 {Sib}
E1      3 35 VALUE (V(6,5)*V(10,20))
R8      25 1 10meg
HI      10 20 V1 1
VI      1 15 0V
H2      25 30 V2 1
V2      35 45 0V
R11     1 65 10meg
* Bridge with active resistance R1 ... R4
R1      55 40 {r1}
R2      40 45 {r2}
R3      50 55 {r3}
R4      50 45 {r4}
*
.ENDS

```

Как и в предыдущем случае, модель предназначена для статических режимов эмуляции. Параметры мостовой схемы – значения активных сопротивлений $r_1 \dots r_4$, статическая удельная чувствительность преобразователя Холла S_{y0}^I объявлены глобальными, что устраняет необходимость внесения изменений в макромодель для ее настройки по характеристикам конкретного преобразователя.

Датчик Холла как компонент *SPICE* и схема его тестирования для синусоидального магнитного поля с амплитудой 100 мТ и частотой 200 Нз показаны на рис. 6.

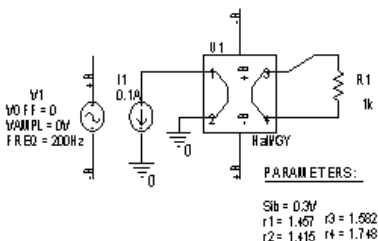


Рис. 6. Схема тестирования.

водов датчика, не превышает 1%.

Вторичный эффект Холла в макромоделях с гираторами. Возникновение напряжения Холла на токовых выводах датчиков магнитной индукции является особым случаем проявления эффекта Холла в гальваномагнитных преобразователях [2]. Это напряжение возбуждается током в нагрузке, подключенной к сигнальным – холловским – выводам преобразователя. Вторичное напряжение эффекта Холла уменьшает напряжение питания преобразователя. Вследствие этого величина управляющего тока падает, что приводит к нарушениям линейности статической характеристики преобразователя.

Очевидно, что ранее полученные выражения, схемы замещения и моделирующие структуры первичного эффекта Холла можно использовать для синтеза макромодели, воспроизводящей проявления вторичного эффекта Холла. Простейший путь создания такой модели заключается в использовании двух моделей с гираторами и четырехполюсниками для раздельной симуляции первичного и вторичного эффектов Холла (рис. 7).

Первичный эффект Холла представлен гираторами GY/U и GY/D , которые в данном случае соединены с симметричным четырехполюсником RB , сформированным резисторами $RB1 \dots RB4$.

Вторая пара управляемых гираторов GY/L и GY/R соединены с симметричным мостовым четырехполюсником RS . Резисторы этого моста $RS1 \dots RS4$ имеют одинаковые с резисторами моста RB значения. Но в данном случае гираторы GY/L и GY/R , подключенные к мосту, повернуты на 90° .

Управляющим током для соединения этих четырехполюсников является ток нагрузки, выделяемый некоторой субмоделью "MINOR CURRENT SELECTOR". Эта часть структуры обеспечивает выбор и подключение меньшего по величине тока к выводам 1, 3 эквивалентной схемы, т.е. тока в нагрузке на сигнальных выводах.

Экспериментально определенные значения активных сопротивлений датчика Холла и его статическая удельная чувствительность объявлены в спецификации компонента PARAMETERS. Погрешность воспроизведения измерительного сигнала и остаточного напряжения, вызванного неэквипотенциальным расположением вы-

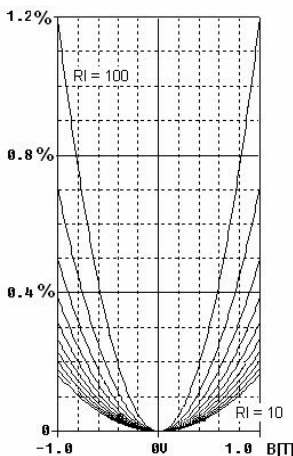


Рис. 8. Нелинейные статические характеристики датчика Холла.

Скрипт *SPICE*-макромодели гальваномагнитного преобразователя на основе эффекта Холла с четырьмя гираторами и двумя резистивными мостами приведен ниже.

```
***** Hall Effect Sensor Macromodel *****
*Equivalent network <Gyrator-Bridge-Gyrator>
* & <Gyrator-Bridge-Gyrator>
*
.PARAM r1=1 r2=1 r3=1 r4=1 Sib=1V
*
*                               Pair with pin 1
*                               | Pair with pin 2
*                               | | Pair with pin 3
*                               | | | Pair with pin 4
*                               | | | | Magn. ind. +B
*                               | | | | Magn. ind. -B
*                               | | | |
.SUBCKT Hall/4GY_BR 1 2 3 4 5 6
```

```
*
* HU1 11U 12U VHU1 1
VHU1 80 13U 0V
RR1 55 7 10meg
ERD 160 175 110 115 0.5
V1 9 10 {Sib}
RS4 155 145 {r4}
EMLTL1 30 0 VALUE {V(60)*V(35)}
RR4 14R 55 10meg
RD1 2 7 10meg
RD4 14D 2 10meg
HIL 60 0 VIL 1
VIL 1 80 0V
RB4 165 130 {r4}
RL2 11L 45 10meg
HR1 11R 12R VHR1 1
VHR1 55 13R 0V
EU1 85 15U VALUE {V(7,8)*V(11U,12U)}
EB 8 7 VALUE {V(6,5)*V(9,10)}
EABSL 65 0 VALUE {ABS(V(60))}
ECR 110 115 VALUE {V(120,90)*V(35,0)}
HIR 75 0 VIR 1
VIR 85 3 0V
RG1 0 180 10meg
RR2 11R 55 10meg
RD2 11D 2 10meg
EGLIMIT 20 0 VALUE {LIMIT(V(15)*1e7,0,1)}
```

```

VREF 10 0 1Vdc
ELU1 95 125 180 185 0.5
HD1 11D 12D VHD1 1
VHD1 2 13D 0V
EL1 120 15L VALUE {V(7,8)*V(11L,12L)}
HU2 14U 16U VHU2 1
VHU2 100 15U 0V
EU2 13U 95 VALUE {V(14U,16U)*V(7,8)}
ED2 13D 170 VALUE{V(14D,16D)*V(7,8)}
RB2 125 130 {r2}
G1 45 55 40 0 1
HL2 14L 16L VHL2 1
VHL2 140 15L 0V
EABSR 70 0 VALUE {ABS(V(75))}
EDIFF2 15 0 VALUE {V(65,70)}
ELD 165 170 180 185 0.5
RS2 140 145 {r2}
RC1 8 6 10meg
RU3 80 15U 10meg
RL3 45 15L 10meg
RU4 14U 80 10meg
RB3 160 165 {r3}
RC2 7 10 10meg
HD2 14D 16D VHD2 1
VHD2 175 15D 0V
HR2 14R 16R VHR2 1
VHR2 155 15R 0V
RS3 150 155 {r3}
RU1 80 7 10meg
RL1 45 7 10meg
EDIFF1 35 0 VALUE {V(10,20)}
RL4 14L 45 10meg
HL1 11L 12L VHL1 1
VHL1 45 13L 0V
ER1 90 15R VALUE {V(7,8)*V(11R,12R)}
RR3 55 15R 10meg
RS1 150 140 {r1}
EL2 13L 150 VALUE {V(14L,16L)*V(7,8)}
RG2 115 0 10meg
ED1 4 15D VALUE {V(7,8)*V(11D,12D)}
RD3 2 15D 10meg
ER2 13R 145 VALUE {V(14R,16R)*V(7,8)}
E_ERU 100 130 110 115 0.5
RU2 11U 80 10meg
RB1 160 125 {r1}
EMULTR 25 0 VALUE {V(20)*V(75)}
ESUM 40 0 VALUE {V(25)+V(30)}
ECL 180 185 VALUE {V(90,120)*V(20,0)}.
ENDS.

```

Выводы. 1. Предложена феноменологическая эквивалентная схема замещения гальваномагнитных преобразователей с последовательным соединением двух идеальных гираторов и неавтономного обратимого четырехполюсника между ними, которая соответствует пространственной и электрической симметрии датчиков Холла и может служить точной алгоритмической основой для синтеза новых макромоделей.

2. На основе схемы замещения с двумя гираторами и четырехполюсником предложены новые структуры, в которых центральный четырехполюсник представляет собой симметричную схему с четырьмя или пятью компонентами. Такие структуры были положены в основу макромоделей датчика Холла.

3. Разработана новая схема замещения преобразователя Холла с четырьмя гираторами и двумя четырехполюсниками, которая воспроизводит влияние вторичного эффекта Холла на его статическую характеристику.

4. Феноменологические эквивалентные схемы использованы в разработке ряда компьютерных макромоделей гальваномагнитных преобразователей на основе эффекта Холла, предназначенных для их использования в структурном и схемотехническом моделировании магнитоизмерительной аппаратуры с автоматической коррекцией и компенсацией погрешностей.

5. Предложенные методы и средства моделирования гальваномагнитных измерительных преобразователей открыты для введения нелинейностей и температурных зависимостей в эмулируемые измерительные сигналы, включения составляющих, вызванных другими эффектами, сопутствующими основному гальваномагнитному эффекту Холла.

Список литературы: 1. Гальваномагнитные преобразователи в измерительной технике / Брайко В.В., Гринберг И.П., Ковальчук Д.В., Таранов С.Г.; под ред. С.Г. Таранова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с. 2. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магниторезисторы. – М.: Энергия. 1971. – 352 с. 3. Popovic R.S. Hall Effect devices. – 2nd ed. Bristol; Philadelphia: Institute of Physics. – 2004. – pp 175–219. 4. D.R. Popovic Three-Axis Teslometer With Integrated Hall Probe / D.R. Popovic, S. Dimitrijevic M. Blagojevic, P. Kejik, E. Schurig, R.S. Popovic // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2007. Vol. 56. No. 4. pp. 1396 – 1402. 5. Dimitropoulos Horizontal Hall devices: A lumped-circuit model for EDA simulators / Dimitropoulos P.D., Drljaca P.M., Popovic, R.S., Chatzinikolaou P. // Sens. Actuat. A. 2008, pp. 161 – 175. 6. Yue Xu. An improved equivalent simulation model for cmos integrated hall plates / Yue Xu, Hong-Bin Pan // Sensors. – 2011. – No 11. – pp. 6284–6296. 7. Мазманиян Р.О. SPICE-модели измерительных преобразователей Холла // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2006, – Ч. 4. – С. 104 – 109. 8. Portmann L. Termis hall plate / Nechnical report. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland. – 2001. 9. Schweda J., Riedling K. A Nonlinear Simulation Model

for High Integrated Hall Devices in Silicon // "Proc. of the Behavioral Modeling and Conference 2002", Santa Rosa, California. **10.** *Brown A. D., Ross J. N., Nichols K. G.* Time-Domain Simulation of Mixed Nonlinear Magnetic and Electronic Systems. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2001. – Vol. 37. – No. 1. – P. 61-91. **11.** *Bell F.W.* Hall Generators Catalog, 6120 Hanging Moss Rd., Orlando FL 32807, 407-678-6900. **12.** *Таранов С.Г.* Гиратор в SPICE-моделях гальваномагнитных преобразователей Холла / *Таранов С.Г., Мазмания Р.О.* // Техн. электродинамика. – 2008. – №1. – С. 56–64. **13.** *Alexander C.K., Sadiku M.N.O.* Fundamentals of Electric Circuits / 3rd. ed. McGraw-Hill College. 2000. pp. 795 – 844. **14.** *Navi M., Edminister J. A.* Electric Circuits. / 4th ed., McGraw-Hill. – 2003. P. 310– 321. **15.** *Марше Ж.* Операционные усилители и их применение. – Л.: Энергия, 1974. – 216 с. **16.** *Курганов С.А., Филаретов В.В.* Символьный анализ и диагностика линейных электрических цепей методом схемных определителей. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 228 с. **17.** *Мазмания Р.О.* Структурное моделирование измерителей магнитной индукции с коммутируемыми выводами датчика Холла // Техн. электродинамика. – 2001. – № 1. – С. 73–80. **18.** *Steiner R.* Offset reduction in Hall devices by continuous spinning current method / *Steiner R., Maier Ch., Haberli A., Steiner F.-P., Baltes H.* // Sensors and Actuators. – 2000. – A. 85. – P. 9-13. **19.** *Bilotti A., Monreal G., Vig R.* Monolithic Magnetic Hall Sensor Using Dynamic Quadrature Offset Cancellation. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1997. – Vol. 32. – P. 829-836. **20.** *Simon P.L.* C Autocalibration of Silicon Hall Devices / *Simon P. L. C., de Vries P. H. S., Middelhoek S.* // IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. – 1995. – Vol. 2. – P. 237-240. **21.** Pat. 6064202 U.S., Int.Cl.7 G01R33/06; G01R33/06; (IPC1-7): G01R33/06. Spinning current method of reducing the offset voltage of a hall device / Inventors: *Steiner R., Haerberli A., Steiner F.-P., Maier C.* Assignee: Physical Electronics Laboratory, Appl. No 09/068398, Filed: 08/24/1998; Publication Date: 05/16/2000. **22.** *Huelsman L.P.* Theory and design of active RC circuits. / New York, McGraw-Hill. – 1968. – P 157-182. **23.** Теоретические основы электротехники. Т. 1. Основы теории линейных цепей / Под ред. *П.А. Ионкина.* – М.: Высш. шк., 1976. – 544 с. **24.** *Атабеков Г.И.* Основы теории цепей. – М.: Лань, 2006. – 432 с.

*Поступила в редколлегию 05.11.2011
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*



Мазмания Рубен Оганесович, к.т.н., с.н.с.

Защитил диплом инженера-электрика в 1968г. в Ереванском политехническом Институте. Кандидатская диссертация защищена в Куйбышевском политехническом институте в 1976 г. Старший научный сотрудник отдела электрических и магнитных измерений Института электродинамики Национальной академии наук Украины, отдел электрических и магнитных измерений. Научные интересы связаны с магнитными измерениями, теорией и практикой цифровой обработкой информации, созданием программно-аппаратных комплексов различного назначения

Е.А. СЕДОВА, ст. преподаватель, НТУ "ХПИ", Харьков

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КОНТАКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ НАГРЕВЕ В СОСТАВЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Приведено результати аналізу методів вимірювання температури розподільних пристроїв. Показана можливість використання методів при вимірюванні температури контактів електричного апарату при тривалому часі роботи розподільного пристрою.

Приведены результаты анализа методов измерения температуры распределительных устройств. Показана возможность использования методов при измерении температуры контактов электрического аппарата при длительном времени работы распределительного устройства.

Введение. Надежность функционирования коммутационных электрических аппаратах (ЭА) в значительной степени определяется состоянием его электрических контактов (ЭК). Основной электрической характеристикой ЭК является их сопротивление, зависящие от температуры [1]. При этом обычно полагают, что нагрев ЭК, в основном, осуществляется за счет токов ЭА. В действительности, в современных распределительных устройствах (РУ) важную роль играет и их косвенный нагрев, за счет передачи тепла от других нагретых частей РУ [2]. В этой связи более точную информацию по состоянию контактов дает контроль за нагревом ЭК.

Цель работы – анализ известных методов контроля температуры ЭА.

Метод измерения с помощью термопленочных указателей температуры. Метод основан на существенной зависимости цвета пленки от воздействующей температуры [3]. Реализация метода осуществляется путем наклеивания специальной термопленки на контролируемую поверхность. Конструктивно такая термопленка представляет собой кружки или полоски нужных размеров. Такие пленки используют в РУ для контроля температуры металлических частей контактов ЭА, головок контактных болтов, губок контактодержателей разъединителей и предохранителей. Достоинством данного метода является то, что термопленки устойчиво сохраняют свои свойства в течении длительного времени, удобны в применении и хранении. Недостатком этого метода является то, что наклеивание этих термопле-

нок может осуществляться только при отключенном ЭА, что не всегда можно осуществить в реальных условиях работы РУ. Кроме того, в новых конструкциях РУ, к которым предъявляются требования электромагнитной совместимости и используются дополнительные экранирующие панели, для обеспечения доступа к этим пленкам требуются специальные доработки конструкции.

Метод измерения температуры с помощью указателей однократного действия. Реализация данного метода основана на использовании специальных термокарандашей и термокрасок, которые наносятся на малодоступные места нагрева ЭК. В качестве материала для таких термоуказателей используется сернокислый кобальт. Достоинством метода является то, что он для своей реализации не требует дополнительного пространства шкафа РУ либо изменения габаритов ЭА. Недостатком метода является то, что использование термокрасок одноразовое либо ограничено малым сроком применения.

Метод измерения температуры с помощью термосвечей. Данный метод применяется для периодического исследования ЭК и для выявления нагрева отдельных элементов при сложном устройстве ЭК. Для реализации данного метода применяется набор из пяти свечей каждая со своей температурой плавления – от 50 до 160 °С. Недостатком метода является узкая область применения, так как он может быть использован только для исследовательских целей и не может обеспечить непрерывный контроль температуры.

Метод измерения температуры с помощью поворотного указателя. Для дистанционного определения температуры ЭК используется поворотно-флажковый или семафорный указатели нагрева. Недостатком метода является то, что для его установки требуется определенный объем пространства РУ.

Метод измерения температуры с помощью электротермометра. Электрическая схема электротермометра представляет собой неравновесный мост, в одно из плеч которого включен плоский медный термометр сопротивления с малыми размерами, а в остальные плечи постоянные сопротивления. Питание моста осуществляется от источника постоянного напряжения (батарейки). Достоинством метода является возможность непрерывного измерения изменения температуры. Такой метод может быть использован для мониторинга температурного состояния ЭК.

Анализ методов. Большинство перечисленных методов обеспечивают контроль температуры ЭК, т.е. соответствие температуры определенному диапазону. Наибольшую точность измерений обеспечи-

вает последний метод. Это обеспечивается путем использования прецизионных резисторов моста и высокоточного источника постоянного напряжения. Кроме того, этот метод единственный, который обеспечивает непрерывное измерение температуры ЭК.

Выводы.

1. Проведен анализ известных методов контроля температуры контактов электрического аппарата при нагреве в составе распределительного устройства. Установлено, что их общим недостатком является узкая область применения, поскольку они могут быть использованы только для исследовательских целей и не могут обеспечить непрерывный контроль температуры.

2. Для мониторинга температуры контактов электрического аппарата может быть рекомендован метод электротермометра, при условии обеспечения высокой температурной стабильности сопротивлений постоянных резисторов измерительного моста.

Список литературы: 1. Хольм Р. Электрические контакты. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 464 с. 2. Кузнецов Р.С. Аппараты распределительных устройств низкого напряжения. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 448 с. 3. Хомяков М.В. Уход за электрическими контактами. – М.-Л.: Энергия, 1967. – 104 с.

*Поступила в редколлегию 29.10.2011
Рецензент д.т.н., проф. Луников В.С.*

И.А. ЦОДИК, канд. техн. наук, доц., ДонГТУ, Алчевск

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РАСЧЕТАХ И КОНСТРУИРОВАНИИ ВОЗДУШНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

У статті описана послідовність розрахунків за допомогою COMSOL Multiphysics параметрів вузла повітряного трансформатора, що застосовується для гальванічної розв'язки тиристорного перетворювача частоти. Розрахунки проводяться з урахуванням вихрових струмів від магнітних полів, що перетинають провідники у поперечному напрямі.

В статье описана последовательность расчетов с помощью COMSOL Multiphysics параметров узла воздушного трансформатора, который применяется для гальванической развязки тиристорного преобразователя частоты. Расчеты проводятся с учетом вихревых токов от магнитных полей, пересекающих проводники в поперечном направлении.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Современная силовая преобразовательная техника требует наличия дешевых и простых в применении высокоэффективных средств согласования и гальванической развязки индукционной нагрузки с источником питания на средних (звуковых) частотах (1 – 10 кГц) при мощностях десятки и сотни киловатт. Наиболее эффективно для этих целей использовать многообмоточный воздушный трансформатор.

Для узла гальванической развязки мощного тиристорного преобразователя частоты используется трансформатор, у которого первичная обмотка содержит несколько катушек включенных параллельно и одну вторичную обмотку, к которой подключена нагрузка. От размеров катушек и их взаимного расположения зависит коэффициент связи, определяющий экономические параметры преобразователя, распределение токов по ветвям и связанные с этим потери в обмотках и загрузка силовых ключей.

Анализ исследований и публикаций. Расчет рабочих процессов в системе нескольких контуров в настоящее время изучен недостаточно. В основном это расчет индуктивностей [1, 2]. Работ, в которых исследовалось взаимное влияние контуров и влияние основного магнитного поля, проходящего поперек трубки автору не известно.

Постановка задачи. Разработать методику математического мо-

делирования многообмоточного трансформатора, что позволит повысить точность расчета взаимоиндуктивностей и тепловых расчетов.

Изложение материала и его результаты. Для решения поставленной задачи можно использовать численные методы, например, метод конечных элементов. Среди множества известных в настоящее время программ одной из наиболее популярных является COMSOL Multiphysics. COMSOL Multiphysics позволяет решать достаточно сложные полевые задачи не вникая в суть метода конечных элементов.

Первым этапом решения задачи – является построение геометрической модели. Понятно, что наиболее более точная была бы трехмерная геометрическая модель. Но такая модель требует серьезных ресурсов компьютера, да и построение самой геометрической модели, представляющей собой систему спиральных контуров, является не простой задачей. Как построить винтовую спиральную геометрическую модель, описано в [3].

Поэтому будем ориентироваться на двухмерную осе симметричную модель. При осе симметричном моделировании витки обмоток заменяются рядом кольцевых витков.

Ход решения будем пояснять на примере расчета узла гальванической развязки тиристорного преобразователя частоты. Структура узла, с указанием основных размеров, показан на рис. 1.

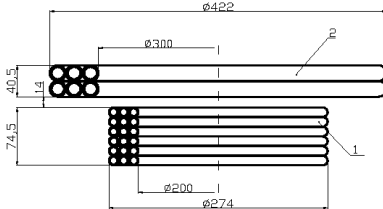


Рис. 1. Структура узла гальванической развязки.

Узел представляет собой высокочастотный трансформатор. Первичная обмотка 1, изготовлена из медной трубки диаметром 12 мм с толщиной стенки 1 мм. Обмотка 1 состоит из трех катушек. Каждая катушка обмотки 1 занимает два ее слоя. Эти катушки работают параллельно. Вторичная обмотка 2 изготовлена из медной трубки диаметром 20 мм, толщина

стенки равна 2 мм. Обмотки размещены соосно.

Для расчетов в списке Application modes (Тип анализа), выбираем AC/DC Module > Quasi-Statics, Magnetic > Azimuthal Induction on Currents, Vector Potential > Time-harmonic analysis. (Модуль AC/DC > Квазистатический, Магнитный > Азимутальные токи, Векторный потенциал > Гармонический анализ).

После построения геометрической модели начинается физическая часть постановки задачи. Здесь необходимо задать параметры модели.

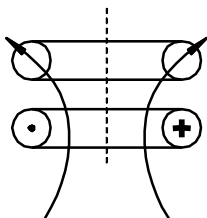


Рис. 2. Магнитное поле витка.

Один из вариантов – это задать плотность тока в витках, а проводимость материала витка принять равной нулю. В этом случае можно задавать ток в одной катушке и определять потокоцепление в катушках. Это позволяет определить параметры без учета вихревых токов от магнитного потока, который проходит поперек витка (рис. 2).

На рис. 2 показано два витка. Ток протекает по нижнему витку. Магнитное поле, наведенное этим током, пересекает оба витка в поперечном направлении и, поэтому, в них наводятся вихревые токи, которые влияют на рабочие процессы. Если эти токи не учитывать, то, изложенный выше подход позволяет получить необходимые параметры, но ошибка при таких расчетах будет значительной.

Поэтому, больший интерес представляет определение параметров с учетом вихревых токов от полей, показанных на рис. 2.

Для расчета параметров трансформатора с учетом влияния вихревых токов от поперечных полей необходимо в областях соответствующих проводникам необходимо задать реальную проводимость материала проводника. Однако представлять систему короткозамкнутых контуров, в которых наводится ЭДС и протекают токи, значительно изменяющие картину поля. Чтобы исключить эти токи предлагается в каждый виток ввести дополнительную ЭДС, направленную против ЭДС, наведенной в витке магнитным полем. Величина этой ЭДС равна среднему значению ЭДС наведенных в разных точках сечения витка. Рассчитываем эту ЭДС по формуле

$$E = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Psi_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где $\Psi_{\text{ср}}$ – среднее потокоцепление витка, f – частота тока в сети, Гц.

Для того, что бы вычислить потокоцепление контура достаточно посчитать циркуляцию вектора магнитного потенциала по этому контуру. Учитывая, что задача осесимметричная

$$\psi = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot A, \quad (2)$$

где A – векторный магнитный потенциал.

Для того, что бы найти среднее значение потокоцепления, проинтегрируем (2) по области соответствующей сечению витка и разделим результат на площадь сечения.

Переходя к инструментам COMSOL Multiphysics, открываем вкладку меню Options/Integration Coupling Variables/Sub domain Variables. Для каждой области, которая соответствует сечению витка, вводим переменную, которая определяется выражением

$$j \cdot 4 \cdot \pi \cdot f \cdot A_{\phi i} \cdot r / S.$$

Здесь $\pi = 3.14159$, f – частота тока, $A_{\phi i}$ – векторный магнитный потенциал, S – площадь области, для которой вычисляется значение ЭДС.

После определения ЭДС для всех областей вводим их как сторонние для соответствующих областей. Теперь получена модель, которая позволяет определить параметры, необходимые для расчета и проектирования трансформатора.

В частности, задавая токи в одной из катушек, определяем индуктивности и взаимные индуктивности катушек. Следует отметить, что, если учитывать влияние вихревых токов, то индуктивности и взаимные индуктивности имеют комплексное значение.

Результаты расчетов индуктивностей и взаимных индуктивностей для трансформатора на рис.1 сведены в табл. 1 и 2. Катушки, составляющие первичную обмотку, имеют номера 1 – 3. Нумерация катушек снизу. Вторичная обмотка имеет номер 4. Индуктивности и взаимные индуктивности, указанные в строке, номер которой соответствует номеру катушки, с катушками, номера которых указаны в столбцах.

Таблица 1 – Расчет индуктивностей и взаимных индуктивностей для трансформатора (действительная часть)

Номера катушек	1	2	3	4
1	10,48892	7,849229	5,498866	3,214263
2	7,837037	9,992143	7,771284	3,963309
3	5,470424	7,753127	10,31077	4,838736
4	3,447035	4,30872	5,313768	15,10306

Таблица 2 – Расчет индуктивностей и взаимных индуктивностей для трансформатора (мнимая часть)

Номера катушек	1	2	3	4
1	-1,178737	-0,2859879	+0,520412	+0,1605568
2	-0,2873345	-1,396755	-0,3042554	-0,05265205
3	+0,517314	-0,3054063	-1,210753	-0,3117232
4	+0,350956	+0,1625013	-0,7694888	-0,5436316

В табл. 1 приведены действительная часть индуктивностей и взаимноиндуктивностей, мкГн на частоте 1000 Гц, а в табл. 2 их мнимая часть. Зная параметры взаимоиндукции и индуктивности не трудно

сформулировать математическую модель узла, которая в классическом виде имеет вид:

$$\begin{aligned} u_1 &= i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{1,2} \frac{di_2}{dt} + M_{1,3} \frac{di_3}{dt} + M_{1,4} \frac{di_4}{dt} \\ u_2 &= i_2 r_2 + M_{2,1} \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{2,3} \frac{di_3}{dt} + M_{2,4} \frac{di_4}{dt} \\ u_3 &= i_3 r_3 + M_{3,1} \frac{di_1}{dt} + M_{3,2} \frac{di_2}{dt} + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{3,4} \frac{di_4}{dt} \\ u_4 &= i_4 r_4 + M_{4,1} \frac{di_1}{dt} + M_{4,2} \frac{di_2}{dt} + M_{4,3} \frac{di_3}{dt} + L_4 \frac{di_4}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь L – индуктивности, а M – взаимные индуктивности катушек. Если учитывать только основную гармонику токов от (3) может быть преобразовано к виду

$$U_1 = I_1 r_1 + I_2 r_{1,2} + I_3 r_{1,3} + I_4 r_{1,4} + I_1 jx_1 + I_2 jx_{1,2} + I_3 jx_{1,3} + I_4 jx_{1,4}$$

$$U_2 = I_1 r_{2,1} + I_2 r_2 + I_3 r_{2,3} + I_4 r_{2,4} + I_1 jx_{2,1} + I_2 jx_2 + I_3 jx_{2,3} + I_4 jx_{2,4}$$

$$U_3 = I_1 r_{3,1} + I_2 r_{3,2} + I_3 r_3 + I_4 r_{3,4} + I_1 jx_{3,1} + I_2 jx_{3,2} + I_3 jx_3 + I_4 jx_{3,4}$$

$$U_4 = I_1 r_{4,1} + I_2 r_{4,2} + I_3 r_{4,3} + I_4 r_4 + I_1 jx_{4,1} + I_2 jx_{4,2} + I_3 jx_{4,3} + I_4 jx_4$$

В этих уравнениях появились активные сопротивления, так как индуктивное сопротивление определяется по формуле

$$x_L = j2\pi fL = j2\pi fL_{\text{Re}} + j2\pi fL_{\text{Im}} = j2\pi fL_{\text{Re}} - r.$$

Здесь L_{Re} , L_{Im} – действительная и мнимая часть индуктивности, r – активное сопротивление индуктивности (взаимоиндукции). Следовательно, активное сопротивление взаимоиндукции равно

$$r_L = -j2\pi fL_{\text{Im}}.$$

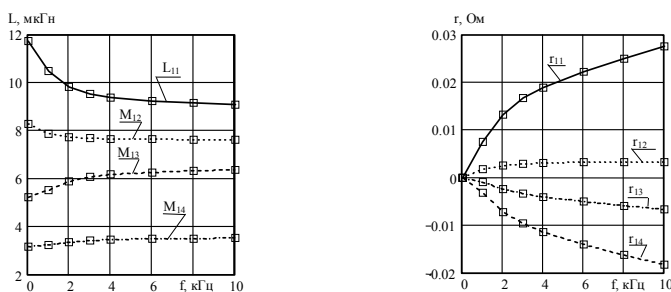


Рис. 3. Зависимость параметров катушки 1 от частоты.

Также следует отметить, что все, указанные параметры зависят от частоты. Для иллюстрации полученных результатов на рис. 3 приведе-

ны зависимости индуктивностей и взаимоиндуктивностей (действительная часть) и активных сопротивлений катушки 1, которые определялись с помощью описанной модели.

Для сравнения следует сказать, что омическое сопротивление этой катушки равно $2,8 \cdot 10^{-3}$ Ома. Зная индуктивности и взаимоиндуктивности можно смоделировать работу узла гальванической развязки в преобразователе частоты [4] и определить токи в катушках. Далее, используя методы планирования эксперимента, или подбором, определить размеры катушек, которые составляют первичную обмотку, при которых токи по ветвям приблизительно равны.

Зная токи, определяем потери в катушках с учетом вихревых токов от поперечных полей. Эти величины необходимы для тепловых расчетов. Интересно отметить, что на частоте 1000 Гц эти потери в 2 – 3 раза превышают потери от протекания рабочих токов.

Вывод. Получена математическая модель, которая позволяет исследовать узел гальванической развязки преобразователя частоты. Определить его параметры, получить данные для теплового расчета и моделирования работы преобразователя.

Список литературы: 1. Немцов М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с. 2. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.: 3. Шмелев В.Е. Прорисовка криволинейного винтового "цилиндра" в трехмерной геометрии, Заметки по использованию системы FEMLAB. Режим доступа <http://trc.dgu.ru/res/matlab/femlab/book2/4/default.html>. 4. Бабищ Е.А. Исследование узла гальванической развязки тиристорного преобразователя частоты / Сборник научных трудов студентов Донбасского государственного технического университета. – Вып. 4. – Ч. 1 – Алчевск: ДонГТУ, 2011. – С. 258 – 263.



Цодик Игорь Абрамович, канд. техн. наук, доцент кафедры "Электрические машины и аппараты" ДонГТУ. Защитил диплом инженера в ДонГТУ по специальности "Электрические машины и аппараты" в 1972 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 1983 г. Научные интересы – математическое моделирование электромеханических устройств и решение полевых задач.

*Поступила в редколлегию 29.10.2011
Рецензент д.т.н., проф. Луников В.С.*

А.А. ЧЕПЕЛЮК, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков
А.Л. ХЛОБЫСТИН, магистр, НТУ "ХПИ", Харьков

О ВЛИЯНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВНУТРИДОМОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НА ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ БЫТОВЫХ ОДНОФАЗНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Проаналізовано вплив технічного стану внутрішньо будинкових розподільчих мереж на електробезпеку побутових однофазних споживачів електричної енергії.

Проанализировано влияние технического состояния внутридомовых распределительных сетей на электробезопасность бытовых однофазных потребителей электрической энергии.

Введение. Проблема безопасного использования электрической энергии бытовыми потребителями появилась с момента появления таких потребителей и на протяжении всего периода ее существования является актуальной.

Актуальность указанной проблемы связана не только с защитой человека или животных от вредного и опасного воздействия электрического напряжения и тока, но и с защитой самого электрооборудования бытовых потребителей от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети, поскольку недопустимые отклонения напряжения в питающей сети, в зависимости от их уровня, ведут к сокращению ресурса работы электроприборов, выходу их из строя, а также, в ряде случаев – возможному их возгоранию.

За последние два десятилетия в Украине произошел существенный скачок в оснащенности жилищ граждан современной электробытовой техникой. Такой скачок связан не только с ростом благосостояния граждан, но и с появлением новых высокотехнологичных электробытовых приборов с высокой степенью автоматизации и широкими функциональными возможностями на основе передовых достижений в электронной технике.

Безопасное и долговечное использование современной бытовой техники, соответствующей современным стандартам по электробезопасности, на практике достигается не только за счет принятия соответствующих стандартов, устанавливающих показатели и нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения [1] и правил уст-

ройства электроустановок [2], но и за счет приведения существующих систем электроснабжения бытовых потребителей в соответствие с указанными стандартами и правилами.

Цель работы – влияние технического состояния внутридомовых распределительных сетей электрической энергии в Украине на электробезопасность бытовых однофазных потребителей.

Особенности распределительных сетей бытовых однофазных потребителей в Украине.

Система электроснабжения жилых зданий, в общем случае, состоит из питающей, распределительной и групповой сети. Питающая сеть – сеть от распределительного устройства подстанции до вводного устройства – ВУ, вводно-распределительного устройства – ВРУ, группового распределительного щита – ГРЩ. Распределительная сеть – сеть от ВУ, ВРУ, ГРЩ до распределительных устройств – РУ и щитков (этажных, квартирных). Групповая сеть – сеть от РУ и щитков до светильников, штепсельных розеток и других электроприемников бытовых потребителей. Питающие и распределительные сети выполняются трехфазными напряжением 380 В с глухозаземленной нейтралью, а отвлечения от распределительных сетей к щиткам конечных потребителей и сами групповые сети потребителей – однофазными напряжением 220 В. Для равномерного нагружения трехфазной линии однофазных потребителей (квартиры, индивидуальные дома) запитывают от разных фаз, нейтральный проводник при этом является общим для всех потребителей.

Питающие и распределительные сети, в системах электроснабжения бытовых потребителей многоквартирных домов, как правило, являются собственностью энергоснабжающих организаций, а групповые сети потребителя, которые начинаются на выходных клеммах счетчика электрической энергии, находится в собственности потребителя электрической энергии. Ответственность за техническое состояние соответствующих сетей лежит на их собственниках.

Электроустановки жилых зданий в Украине выполняются в соответствии с "Правилами устройства электроустановок" (ПУЭ) [2], последние изменения которых производились в 2006-2008г. Начиная с 2002г. в Украине, применительно к электроустановкам жилых зданий, распространяются "Правила устройства электроустановок. Электрооборудование специальных установок", которые входят в состав ПУЭ [2]. Указанная часть ПУЭ распространяется на электрооборудование специальных установок зданий и сооружений, вновь строящихся или реконструируемых в Украине с 2002 г. В соответствии с [2], электро-

снабжение электроприемников бытовых потребителей должно выполняться от электрической сети с глухозаземленной нейтралью 380/220В с системой заземления TN-S или TN-C-S.

С целью повышения электробезопасности в жилых зданиях, в соответствие с современными общеевропейскими правилами и нормами по электробезопасности, в указанных правилах также предписано использование аппаратов защитного отключения (АЗО) и систем защитного уравнивания потенциалов (основной системы – на вводе в дом и дополнительной – для ванных и душевых).

Поскольку основная часть жилого фонда в Украине введена в эксплуатацию задолго до указанных изменений в ПУЭ, на сегодняшний день, системы электроснабжения указанных однофазных бытовых потребителей выполнены с системой заземления TN-C. В таких системах нейтральный проводник (N – проводник), электрически соединенный с нейтральной точкой источника питания и используемый для распределения электроэнергии, и проводник защитного заземления (PE – проводник) объединены в одном проводнике (PEN – проводнике) по всей протяженности сети.

Недостатком такой системы заземления однофазного потребителя, по сравнению с системами TN-S и TN-C-S является, то, что PEN – проводник, соединяющий в себе функции защитного (PE), и нейтрального (N) проводников испытывает на себе термическое действие токов как номинального режима, так и режима короткого замыкания. Указанные токи протекают не только по PEN проводникам групповых однофазных сетей, но и по PEN проводникам питающей и распределительной сетей – из-за неравномерной нагрузки фаз. Со временем тепловые расширения этого проводника, вызванные протеканием указанных токов, могут привести к нарушению целостности этого проводника – из-за ухудшения электрического контакта (увеличение сопротивления контакта, подгорание, отгорание провода) в местах соединения его отдельных участков на всей его протяженности и, как следствие этого, аварий в сети связанных с обрывом PEN проводника в трехфазных сетях с глухозаземленной нейтралью при несимметричных нагрузках.

Состояние внутридомовых распределительных сетей бытовых потребителей в Украине.

В настоящее время в Украине значительная часть сетей электроснабжения жилых зданий старой постройки (включая понижающие трансформаторы; воздушные линии; кабельные линии; внутридомовые линии (подъездные, квартирные); защитные, соединительные и комму-

тационные аппараты) практически выработала свой расчетный технический ресурс или приближается к указанной отметке и давно нуждается в реконструкции и модернизации, что требует значительных финансовых ресурсов. Кроме того, следует отметить, что распределительные сети большинства многоквартирных домов старой постройки или их отдельные участки работают в перегруженном режиме, что не только существенно сокращает срок их службы, но и снижает их надежность. Это происходит из-за того, что за последние 10-15 лет существенно возросла потребляемая мощность бытовых потребителей, в связи с увеличением у них числа бытовых электроприборов и их мощности, а установленная проектная мощность таких сетей осталась на прежнем уровне. Результатом изношенности и перегруженности указанных сетей является увеличение числа аварий, связанных с отгоранием фазных и PEN проводников, а также провалы напряжения.

Из-за недостатка финансовых ресурсов у энергоснабжающих организаций, в чьей собственности находятся питающие и распределительные сети электроснабжения жилых зданий, требуемых для своевременной модернизации и реконструкции указанных сетей, не смотря на изношенность этих сетей, их эксплуатация в таком состоянии продолжается и, скорее всего, будет продолжаться еще долго.

Изношенность указанных сетей электроснабжения жилых зданий также требует существенного увеличения затрат на их обслуживание и ремонты. Это привело к тому, что своевременное обслуживание указанных сетей практически не ведется, или ведется не в полном объеме и не качественно (особенно это касается внутридомовых распределительных сетей многоквартирных домов).

Дополнительные риски обрыва фазных проводников и, что особо опасно с точки зрения временных перенапряжений и провалов напряжения у однофазных потребителей – разрыва PEN проводника на участках распределительной и питающей сетей, также существуют и из-за невысокой квалификации обслуживающего персонала, допускающего ошибочное подключение PEN проводников к фазным проводникам во время ремонтов указанных сетей. К сожалению, такие случаи не одиноки, а результат - массовый выход из строя электрооборудования целых подъездов, домов и даже целых районов, запитанных от одной подстанции [3-8]. В воздушных линиях электроснабжения бытовых потребителей указанные риски возникают также и из-за погодных условий.

В качестве примера, в подтверждение вышеприведенных выводов, на рис. 1 приведено состояние двух этажных распределительных щитков (коробок) от которых запитаны внутриквартирные щитки од-

ного из семиэтажных домов из двух подъездов постройки конца 50-х годов прошлого века (состояние остальных распределительных коробок – практически аналогичное). Изначально в указанных щитках были установлены изоляционные колодки с 4-мя болтовыми клеммами, под которые были заключены фазные и PEN проводники внутридомовой распределительной сети с ответвлениями к потребителям (все проводники из алюминия). В разное время в обоих коробках происходило отгорание соединений одного из фазных проводников и PEN проводника и обугливание изоляционного материала в местах установки этих соединений, что косвенно свидетельствует о том, что своевременное обслуживание щитков не производилось. Ремонтные работы, производимые в разное время, заключались в соединении проводников выгоревших соединений некачественной скруткой. После таких ремонтов остались оголенными (без изоляции) значительные участки отгоравших фазных и PEN проводников, которые остались никак не закрепленными в коробке и находятся в непосредственной близости между собой, что в любой момент может привести к короткому замыканию. Т.к. скрутка PEN проводников после проведенных ремонтов практически "висит в воздухе", металлические корпуса этих щитков оказались не связанными электрически с PEN проводником, что противоречит требованиям ПУЭ.

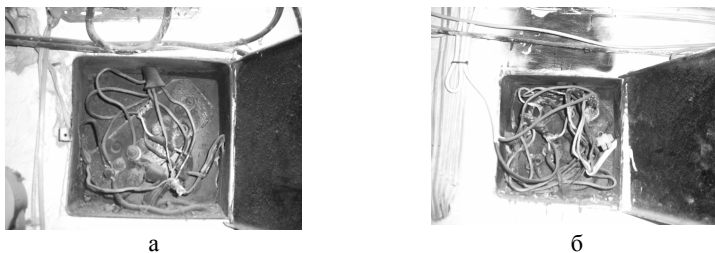


Рис. 1. Состояние этажных распределительных щитков (коробок) 7-го (а) и 6-го (б) этажей семиэтажного дома старой постройки.

Состояние групповых сетей бытовых однофазных потребителей в Украине.

По сравнению с внутридомовыми распределительными сетями многоквартирных домов старой постройки, состояние групповых однофазных сетей бытовых потребителей в таких домах находится, как правило, в намного лучшем состоянии, так как большинство бытовых

потребителей - собственников этих сетей понимают, что от ее состояния во многом зависит электробезопасность его и его родных, а также пожаробезопасность самого жилья и имущества.

Для приведения групповых внутриквартирных сетей в соответствие с современными требованиями электро- и пожаробезопасности отдельные собственники проводят реконструкцию старых внутриквартирных групповых сетей системы TN-C в систему TN-C-S с использованием аппаратов защитного отключения (АЗО) в соответствии с современными нормами. Разделение нейтрального и защитного проводников в таких случаях, как правило, производят на вводе в квартиру рис. 2.а.

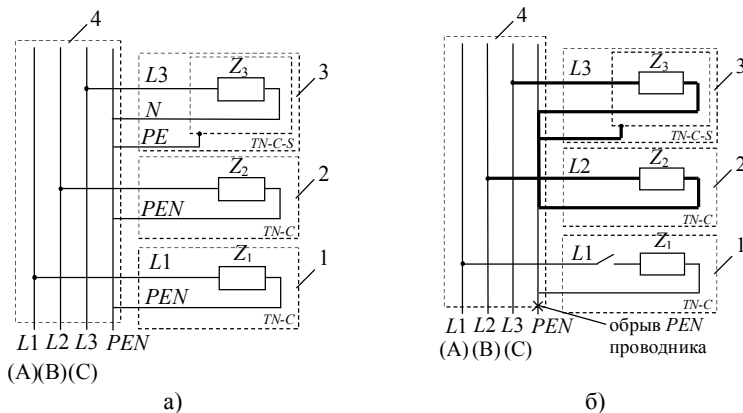


Рис. 2 Подключение однофазных потребителей электроэнергии на этаже многоквартирного дома (1, 2 – квартиры с системой электроснабжения TN-C, 3 – квартира с системой электроснабжения TN-C-S, 4 – внутридомовая распределительная сеть).

При проведении такой реконструкции бытовой потребитель должен помнить, что перед ее проведением необходимо разработать проект реконструкции и согласовать его с энергоснабжающей организацией. Разработку и реализацию проекта нужно доверять лишь проверенным специалистам с высокой репутацией. В противном случае, средства, затраченные на реконструкцию сети, не принесут желаемого эффекта, а в ряде случаев, даже наоборот, могут ухудшить этот эффект по сравнению с первоначальным.

Так при неудовлетворительном состоянии внутридомовых распределительных сетей вероятность обрыва (отгорания) PEN проводника на близстоящем к питающему трансформатору участке существенно повышается. Если после реконструкции внутриквартирной сети в систему TN-C-S в домах старой постройки с неудовлетворительным состоянием внутридомовых распределительных сетей происходит обрыв PEN проводника, корпуса зануленных электроприборов у данного потребителя при включенной какой-либо нагрузке в соседней фазе (другого потребителя) на участке за местом обрыва PEN проводника окажутся под напряжением – рис. 2,б, поскольку нагрузки в таких системах электропитания являются несимметричными.

Отключение питания с помощью АЗО в этом случае не произойдет, а если и произойдет (при нарушении изоляции в и появлении тока утечки), то это не приведет к снятию напряжения соседней фазы с корпуса зануленных электроприборов. Указанная аварийная ситуация представляет реальную угрозу не только включенным в это время электроприборам, но и жизни людей, в случае их касания в момент аварии к металлическим корпусам электроприборов.

Векторные диаграммы напряжений и токов при несимметричной трехфазной нагрузке и обрыве PEN проводника приведены на рис. 3.

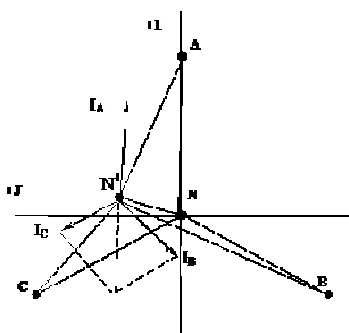


Рис. 3 Векторная диаграмма при обрыве нулевого проводника.

Уровни перенапряжений и провалов напряжения у однофазных потребителей в случае разрыва PEN проводника в распределительной или питающей сети зависят от соотношения сопротивлений нагрузок потребителей.

При реконструкции старых внутриквартирных групповых сетей системы TN-C в систему TN-C-S также нужно помнить, что ПУЭ [2] для ванн, душевых и саун запрещается использование систем местного уравнивания потенциалов без основной системы – на вводе в дом.

Выводы. Из-за значительной изношенности, а местами и неудовлетворительного технического состояния внутридомовых распределительных электрических сетей многоквартирных домов старой постройки в Украине, все бытовые потребители, подключенные к таким сетям

и их электроприборы, вне зависимости от технического состояния внутриквартирных групповых сетей находятся в зоне повышенного риска аварий, связанных с разрывом PEN проводника во внутридомовых распределительных сетях. Указанные аварии представляют опасность жизни людей и ведут к сокращению ресурса работы электроприборов, выходу их из строя, а также, в ряде случаев - возможному их возгоранию. Решение указанной проблемы в долгосрочной перспективе может быть достигнуто за счет повышения ответственности энергоснабжающих организаций и организаций, обслуживающих внутридомовые распределительные сети многоквартирных домов, и принятия государственных программ по реконструкции распределительных сетей с первостепенным приоритетом внутридомовых распределительных сетей многоквартирных домов старой постройки.

Вопрос применения реле напряжения для защиты бытовых однофазных потребителей от недопустимых отклонений напряжения в сети, в том числе связанных с обрывом PEN проводников в распределительных и питающей сетях, требует дополнительного изучения и всестороннего анализа, так как, в настоящее время, в Украине указанные аппараты не подлежат обязательной сертификации и отсутствуют отдельные стандарты на эти устройства, регламентирующие их характеристики и защитные функции. Указанные обстоятельства привели к тому, что на украинском рынке за последнее время появилось широкое многообразие указанных защитных реле сомнительного качества и функционального назначения, что может привести при эксплуатации таких устройств к дополнительным аварийным ситуациям в сетях бытовых потребителей.

Список литературы: 1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. 2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) – Харьков: Форт, 2009. – 704 с. 3. <http://kiev.vgorode.ua/news/47321/>. 4. http://kp.ua/Default.aspx?page_id=2&date=220909&news_id=195215. 5. <http://normavolt.com.ua/press-center/article/2011/10/>. 6. <http://www.objectiv.tv/070911/60149.html>. 7. <http://www.youtube.com/watch?v=jRYR2dXaEgq>. 8. <http://starkproject.com/electroenergy/electric-power/1472-rozvitie-electricheskih-setej.html?start=2>.

*Поступила в редколлегию 24.10.2011
Рецензент д.т.н., проф. Луников В.С.*

Л.П. ГАЛАЙКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА
РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО –
ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ РУДНИЧНОГО
ЭЛЕКТРОВОЗА**

В статті розглядається питання аналізу перехідних процесів від режиму двигуна до режиму рекуперативного гальмування вентильно-індукторного двигуна рудничного електровоза за допомогою програми Simulink пакета програм Matlab. Наведені розроблені імітаційні моделі та результати розрахунків на цих моделях для двигуна потужністю 27 кВт та частотою обертів 1215 об/хв.

В статье рассматривается вопрос анализа переходных процессов от режима двигателя к режиму рекуперативного торможения вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза с помощью программы Simulink пакета программ Matlab. Приведены разработанные имитационные модели и результаты расчетов на этих моделях для двигателя мощностью 27 кВт и частотой вращения 1215 об/мин.

Введение. Вентильно-индукторные двигатели (ВИД) являются перспективными двигателями для рудничных электровозов, где в настоящее время используются двигатели постоянного тока. Разработке и исследованию различных режимов работы ВИД для рудничного электровоза, в том числе и режима торможения, посвящена работа [1]. Кроме того, режим торможения ВИД рудничного электровоза рассматривается в работе [2]. В работе [1] приведен экспериментальный график тока для рекуперативного режима, а в работе [2] рассчитаны механические характеристики в тормозных режимах при постоянных параметрах управления. В обеих работах отсутствует анализ переходного процесса от одного режима работы к другому.

Характеристики, рассчитанные в работе [2], приведены на рис. 1. Как следует из рисунка, работа ВИД в тормозных режимах при постоянных параметрах управления практически невозможна. Однако главной особенностью ВИД является возможность быстрого изменения параметров управления за счет применения современной электроники и микропроцессорной техники. Анализ переходных процессов при изменении параметров управления для перехода от одного режима

работы к другому необходим для разработки качественной программы для микропроцессора контроллера.

Наиболее просто и наглядно эти процессы можно проанализировать с помощью имитационной модели для программы SimuLink пакета программ Matlab. Вопросу создания и использования имитационных моделей для анализа динамических режимов ВИД посвящены работы [3,4].

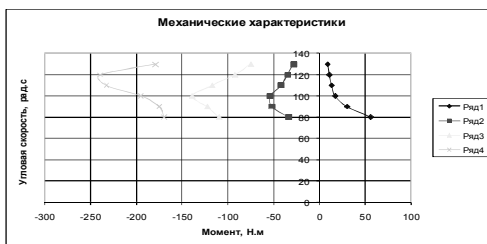


Рис. 1. Механические характеристики ВИД рудничного электровоза в тормозных режимах при постоянных параметрах управления.

Цель работы. С помощью разработанной автором модели провести расчеты переходных процессов от режима двигателя к режиму рекуперативного торможения, в которых с помощью фазового регулирования обеспечивается постоянство скорости.

Описание расчетного эксперимента. Исследования проведены на примере четырехфазного ВИД мощностью 27 кВт, частотой вращения 1215 об/мин, спроектированного для привода рудничного электровоза на базе двигателя постоянного тока, который выпускается серийно. На рис.2 приведена основная имитационная модель, подробно описанная в работе [5], включающая 2 дополнительные субмодели, одна из которых приведена на рис.3. Субмодель на рис. 3 задает закон изменения углов включения и отключения Θ_{on} и Θ_{off} , углов между полюсами статора и ротора, при которых включаются и отключаются транзисторы, подающие напряжение на катушки фаз. Вторая дополнительная субмодель определяет среднее значение момента на периоде и останавливает расчет при выполнении равенства среднего момента двигателя и момента нагрузки.

На рис.4 – 6 приведены графики изменения скорости, момента двигателя, момента нагрузки, угла Θ в одной из фаз, среднего момента для различных переходных процессов. Для поддержания постоянной

скорости углы Θ_{on} и Θ_{off} необходимо уменьшать при переходе от режима двигателя к режиму генератора. На рис. 4 – 7 приведены графики при разных законах изменения этих углов.

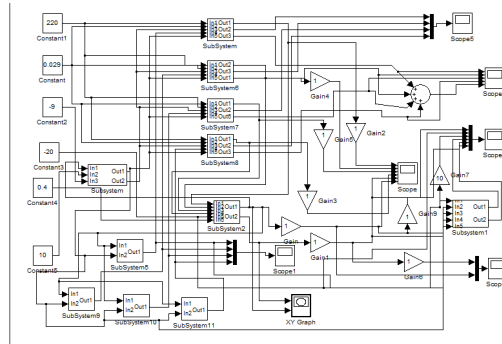


Рис.2. Основная имитационная модель ВИД рудничного электровоза.

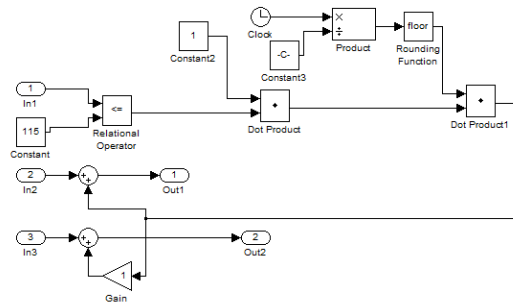


Рис.3. Дополнительная субмодель для задания управляющих параметров.

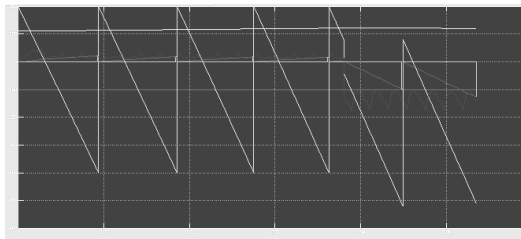


Рис.4. Переход от режима двигателя (момент 20 Н.м) к режиму генератора (момент -120 Н.м).

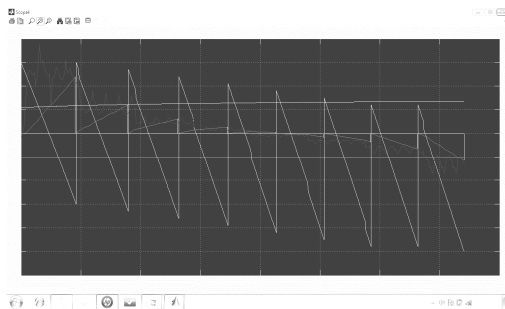


Рис.5. Переход от режима двигателя (момент 220 Н.м) к режиму генератора (момент -120 Н.м).

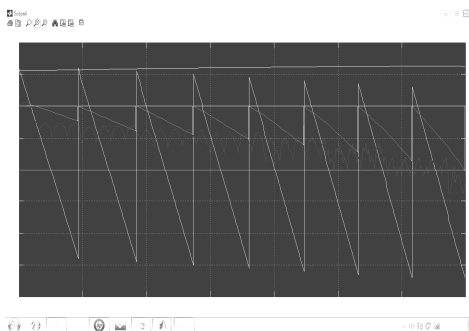


Рис.6. Переход от режима генератора (момент -40 Н.м) к режиму генератора (момент -200 Н.м).

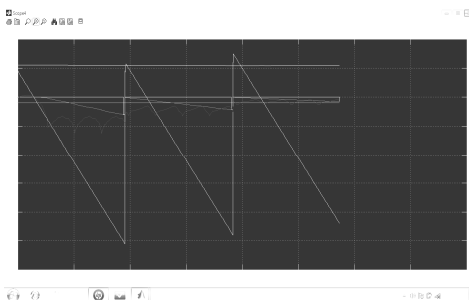


Рис.7. Переход от режима генератора (момент -60 Н.м) к режиму генератора (момент -20 Н.м)

Выводы.

1. Проведенные расчеты показали возможность работы вентильно-индукторного двигателя в режиме рекуперативного торможения.
2. Для обеспечения требуемого режима необходима разработка качественной программы для микропроцессора контроллера.
3. Имитационная модель является хорошим тренажером для разработки такой программы.

Список литературы: 1. Коломойцев Л.Ф. и др. Режимы работы тягового электропривода рудничного электровоза с трехфазным реактивным индукторным двигателем / Известия вузов. Электромеханика. №2. 2002г. 2. Галайко Л.П. Вентильно-индукторный двигатель в тормозных режимах. Электромашинобудовання та електрообладнання. "Техніка". 2004. 3. Galayko L.P. Analysis different dynamic modes in simulation model of switched reluctance motor. ABSTRACTS. ICEEE-2010. 13th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. September 19-25, 2010. – Alushta, Crimea, Ukraine. – p. 96. 4. Галайко Л.П. Имитационное моделирование динамических характеристик вентильно-индукторного двигателя стиральной машины. Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2010. – №55. 5. Галайко Л.П. Имитационное моделирование вентильно-индукторного двигателя в переходных режимах // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2005. – №48, – С. 24-27.



Галайко Лидия Петровна, доцент, кандидат технических наук. Защитила диплом инженера, диссертацию кандидата технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты соответственно в 1960 и 1969 гг. Доцент кафедры "Электрические машины" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 1975 г. Научные интересы связаны с проблемами специальных электрических машин, в частности, вентильно-индукторных.

*Поступила в редколлегию 08.11.2011
Рецензент д.т.н., проф. Мильх В.И.*

А.В. ЕГОРОВ, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков **В.В. НАНИЙ**,
канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков
В.Д. ЮХИМЧУК, канд. техн. наук, проф, НТУ "ХПИ", Харьков
Д.В. ПОТОЦКИЙ, ассистент, НТУ "ХПИ", Харьков

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СЕРДЕЧНИКА ДВИГАТЕЛЯ С КАТЯЩИМСЯ РОТОРОМ, С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

Розглянуто тепловий стан двигуна з ротором, що котиться (ДКР), при використанні різних марок сталей, в якості масивного осердя, з урахуванням мінливості коефіцієнта теплопровідності. Проведена оптимізація конструкції осердя ДКР.

Рассмотрено тепловое состояние двигателя с катящимся ротором (ДКР), при использовании различных марок сталей, в качестве массивного сердечника, с учетом непостоянства коэффициента теплопроводности. Проведена оптимизация конструкции сердечника ДКР.

Введение. Материал сердечников статора и ротора оказывает существенное влияние на электромагнитные свойства электрической машины. Для двигателей с катящимся ротором (ДКР) это влияние еще более значительно, т.к. было показано в [1]. Выбор материала сердечников ротора и статора, а так же вид их механической обработки непосредственно связан с развиваемым вращающимся моментом ДКР. Поэтому для ряда вариантов режимов работы ДКР целесообразно применять массивные сердечники.

Цель, задачи исследования. Установить наиболее оптимальную марку стали для массивного сердечника ДКР в тепловом отношении.

Основной текст. В качестве материала сердечников статора и ротора двигателя с катящимся ротором, рассматривались стали СтЗСП, Сталь 20, Сталь 45, Сталь 40Х, 2013. В магнитном отношении наилучшие показатели относятся к сталям 2013 и СтЗ. После термической обработки лучшие магнитные свойства начинает приобретать Сталь 40Х.

Исследуемый ДКР предназначен для работы в режиме S4 с максимально укороченным циклом работы, что приводит к быстрому нагреву машины. Поэтому необходимо учитывать динамику теплового состояния машины.

С этой целью, был проведен анализ динамики теплового состояния, ДКР, который запитывался от преобразователя, с потребляемым током 8 А, вращающим моментом 160 Нм, частотой вращения 0,2 об/мин, с повторяющимся режимом короткого замыкания через каждые 3 секунды. Температура окружающего воздуха 20 °С.

Для моделирования теплового состояния машины и его анализа использовалась программа COSMOS SolidWorks, с последующим сравнением. Для этого разработана геометрическая модель, со следующими главными размерами: внутренний диаметр расточки статора

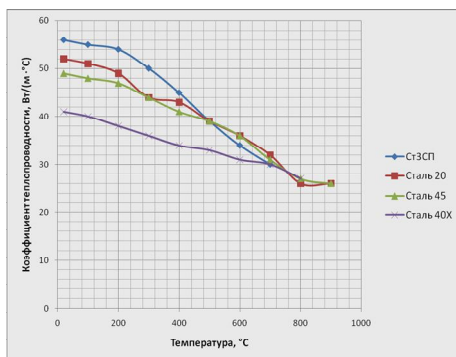


Рис.1 Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, для различных марок стали.

одномерного температурного поля, метод эквивалентных тепловых схем), учитывалось непостоянство коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры (рис. 1).

Проведенные эксперименты на матмоделе показали, что наилучшие значения теплового состояния получаются при использовании стали марки СтЗСП Сталь 20.

Таблица – 1 Сравнение максимальных значений температур

Марка стали	СтЗСП	Сталь 20	Сталь 45	Сталь 40X
Максимальный нагрев, °C	148	152	155	161

На основании анализа магнитного и теплового состояния материалов возможных к применению в качестве массивных сердечников статора и ротора наиболее оптимальной является сталь СтЗСП.

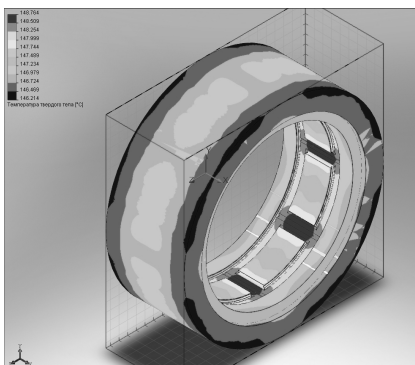


Рис.2. Распределение теплового поля ДКР, ротор не показан.

После математического моделирования и получения картины распределения теплового поля, видно, что наиболее активно нагретым является место контакта двух обмоток. Это справедливо, т.к. все обмотки являются главными источниками тепловыделения, а сердечник теплоотводом. Для уменьшения максимума локального нагрева, было предложено, сделать в сердечнике статора вентиляционные окна, для непосредственного контакта активной части с окружающей средой. Помимо этого, выполнение этих окон, позволит облегчить механическое изготовление статора, при выполнении паза внутри сердечника и увеличит поверхность теплоотдачи. Так же замыкание магнитного потока будет происходить через катки и сердечник, а не через соседний полюс, что является негативным с точки зрения распределения силы одностороннего магнитного притяжения (рис. 3).

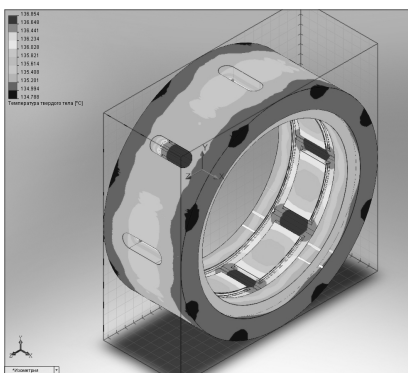


Рис. 3. Распределение теплового поля ДКР с вентиляционными окнами, ротор не показан.

После математического моделирования и получения картины распределения теплового поля, видно, что наиболее активно нагретым является место контакта двух обмоток. Это справедливо, т.к. все обмотки являются главными источниками тепловыделения, а сердечник теплоотводом. Для уменьшения максимума локального нагрева, было предложено, сделать в сердечнике статора вентиляционные окна, для непосредственного контакта активной части с окружающей средой. Помимо

Выводы. В результате исследования моделирования распределение теплового поля, выбрана оптимальная конструкция и марка стали для массивного сердечника двигателя с катящимся ротором. Применение марки стали СтЗПС позволило уменьшить максимальный нагрев двигателя на 13°C , по сравнению с Сталь 40Х, а изготовление вентиляционных окон в сердечнике статора, уменьшило локальный нагрев на 12°C .

Список источников литературы: 1. Авраменко А.А., Тищенко А.А., Масленников А.М., Выбор материала магнитопровода для электрических машин с катящимся ротором // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тематичний вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2010. – №36. – С. 3-8. **2. Журавлев В.Н., Николаева О.И.** Машиностроительные стали. Справочник. Изд. 3-е, М.: Машиностроение, 1981 – 391 с.



Егоров Андрей Владимирович, аспирант кафедры электрических машин. В 2009 г. защитил диплом магистра в Харьковском политехническом институте по специальности "Электрические машины и аппараты".

Ассистент кафедры электрических машин с 2009 г.

Научные интересы связаны с исследованием двигателей с катящимся ротором.



Наний Виталий Викторович, доцент, кандидат технических наук. Закончил в 1980 г. Харьковский политехнический институт по специальности "Электрические машины". В 1987 г. защитил диссертацию в Харьковском политехническом. На данный момент работает в НТУ "ХПИ" на должности доцента кафедры электрических машин. Научные интересы связаны с исследованием ДКР и совершенствованием их параметров.



Юхимчук Владимир Данилович, профессор, кандидат технических наук. Закончил в 1968 г. Харьковский политехнический институт по специальности "Электрические машины и аппараты". В 1980 г. защитил диссертацию в Харьковском политехническом институте. Работает в НТУ "ХПИ" на должности профессора кафедры электрических машин. Научные интересы связаны с исследованием ДПТ и их коммутации.



Потоцкий Дмитрий Васильевич, ассистент кафедры "Электрических машин". В 2009 г. закончил Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт" по специальности "Электрические машины и аппараты".

Научные интересы связаны с исследованием возможности применения наноматериалов в электрических машинах

Поступила в редколлегию 14.12.2011

Рецензент д.т.н., проф. Мильх В.И.

В.И. МИЛЫХ, д-р техн. наук, проф., зав. каф., НТУ "ХПИ", Харьков

В.С. ШПАТЕНКО, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков

В.В. КУЗЬМИН, д-р техн. наук, проф., каф., УИПА, Харьков

ПРИЧИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ СКЛЕЕННЫХ ПАКЕТОВ СЕРДЕЧНИКОВ СТАТОРОВ КРУПНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Виконан аналіз причини виникнення пошкоджень склеєних пакетів осердь статорів великих турбогенераторів з однаковою конструктивно-технологічною основою на прикладі машин серії ТВВ-320 і ТГВ-300.

Выполнен анализ причины возникновения повреждений склеенных пакетов сердечников статоров крупных турбогенераторов с одинаковой конструктивно-технологической основой на примере машин серии ТВВ-320 и ТГВ-300.

Введение. Обзор наиболее часто встречающихся дефектов зубцовой зоны сердечников статоров турбогенераторов позволил считать, что:

- усталостные повреждения с последующим выкрашиванием фрагментов, которые представляют большую опасность и ограничивают работоспособность турбогенератора;

- обрывы листов вдоль вентиляционных распорок и их изломы в глубине зубца; разрушения распространяются на значительную глубину зубцов, а также возрастает скорость развития повреждений активной стали;

- вентиляционные распорки полностью разрушаются на глубину до 50 мм и имеют износ на 1-3 мм по толщине распорки на глубину до 150 мм и более от поверхности расточки статора.

Как отмечено в [1] "при создании турбогенераторов с запеченными крайними пакетами сердечников статоров высказывалась надежда, что подобные повреждения не будут иметь место. Однако последующая эксплуатация и обследования таких турбогенераторов показали, что и на них имеют место повреждения зубцов крайних пакетов, хотя и существенно реже, чем у турбогенераторов с незапеченными пакетами. На нескольких турбогенераторах по этой причине возникали аварийные отключения".

Цель работы – объяснить почему повреждаются склеенные пакеты сердечников статоров турбогенераторов серии ТВВ-320, тогда как

они не ломаются на машинах серии ТГВ-300.

Основные материалы исследования. В [2] нами показано, что использование метода магнитных натяжений для расчета осевых вибровозмущающих сил в сердечниках статоров крупных турбогенераторов дает результаты, которые и количественно и качественно противоречат экспериментальным данным. Коренная причина здесь заключается в том, что эти осевые усилия возникают в результате воздействия основного, рабочего магнитного потока, а отнюдь не потока рассеяния в торцевых зонах сердечника. При этом силы с частотой 100 Гц приложены к крайним листам каждого пакета, что при оптимальных значениях индукции в зубах приводит к возникновению динамических напряжений, которой иногда могут превышать статическое давление запрессовки, при этом обе составляющих складываются.

Никакие из перечисленных гипотез (старение турбогенераторов, режимные особенности, низкий уровень сервисного обслуживания, нагрев стержней шихтовочных ребер), не имеют прямого отношения к решению рассматриваемой проблемы.

Изломы склеенных пакетов, листов зубцов и износ вентиляционных распорок турбогенераторов всех серий ТВВ – следствия одной и той же коренной причины, сопутствующим фактором которой является резкое снижение давления прессовки на 30-40% из-за усадки сердечника.

Но при той же конструктивно-технологической основе и работе в таких не легких эксплуатации ничего подобного не наблюдается на целом ряде машин других серий [3].

В создавшейся запутанной ситуации ключом к решению этой комплексной проблемы послужило упомянутые в [1] "недостаточная прочность или неправильная установка нажимных пальцев; этот дефект изготовления сердечника обнаруживается обычно визуально, так как приводит к пластической деформации и (или) смещению пальцев от первоначального положения".

Согласно данным, приведенным в [4], как это неудивительно – запас прочности в нажимных пальцах ТВВ-320-2 только от действия статического давления запрессовки составляет всего лишь 14%.

По нашим оценочным расчетам к статическому давлению $p_0 = 1,2$ МПа при номинальной нагрузке в этой машине добавляется еще в пике 101-герцовая составляющая $p_d = 1,66$ МПа.

Хотя нажимные элементы обоих турбогенераторов разрабатывались по одним и тем же устаревшим канонам, запас прочности в ТВВ-320 явно недостаточен. А в ТГВ-300 – избыточен.

Таблица 1 – Показатели запасов прочности машин ТВВ-320 ("Электросила") и ТГВ-300 ("Электротяжмаш")

Генератор	В статике при $p_c = 1,2$ МПа					В динамике при $p_{\max} = 1,2 + 1,66 = 2,86$ МПа	
	Момент M_2 , Н·мм	Сечение пальцев $t \times s$, мм	Момент сопротивления W , мм ³	Напряжение в корне пальца σ_c , МПа	Запас прочности $k_c = 1 - \sigma_c / \sigma_s$	Макс. запас прочн. $\sigma_{\max}$, МПа	Запас прочн. $k_d = 1 - \sigma_m / \sigma_s$
ТВВ-320	$1,05 \cdot 10^8$	20×45	6750	259	+0,14	531	-1,05
ТГВ-300	$0,59 \cdot 10^8$	48×48	18430	53	+0,72	129	+0,57

После отгиба нажимного пальца динамические усилия в комбинации со статическими ломают и отгибают клеевые пакеты, а после распрессовки статора появляются остальные из вышеперечисленных дефектов. Более того в [5] нами показано, что работа турбогенераторов в режиме недовозбуждения резко снижает уровень динамических составляющих внутренних давлений в сердечнике статора.

Выводы. Основной причиной массового возникновения дефектов в сердечниках статоров турбогенераторов типа ТВВ-320-2 является недостаточная прочность нажимных пальцев. Такова же причина и недостаточного уровня надежности турбогенераторов ТВВ-1000-2 на АЭС Украины.

Список литературы: 1. *Голоднова О.С., Ростик Г.В.* Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов // *Электросила*. – 2004. – № 43. 2. *Кузьмин В.В., Шпаченко В.С.* К расчету осевых сил в сердечнике статора мощного двухполюсного турбогенератора // *"Электротехника и электромеханика"*. – 2010. – № 2. 3. *Кузьмин В.В., Ливиниц А.Л., Шпаченко В.С.* Малокапитальные и энергосберегающие технологии реабилитации турбогенераторов – основа технического перевооружения энергетики Украины // *Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика*. – 2011. – № 1. – С. 226-227. 4. *Хуторецкий Г.М., Токков М.И., Толвинская Е.В.* Проектирование турбогенераторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с. 5. *Шпаченко В.С., Милых В.И.* О влиянии режимов

недовозбудження на ефективність експлуатації турбогенераторів // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. – 2011. – №1. – С. 176-177.



Міліх Володимир Іванович, професор, доктор технічних наук. Захистив диплом інженера, дисертації кандидата і доктора технічних наук в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини і апарати, відповідно в 1972, 1978 та 1996 рр. Завідувач кафедри "Електричні машини" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 2004 р. Наукові інтереси пов'язані з дослідження електромагнітних параметрів та процесів в електричних машинах різних типів



Шпатенко Віктор Сергійович, аспірант. Захистив диплом магістра в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" в 2010 р. Наукові інтереси пов'язані з дослідженням електромагнітних та силових процесів в потужних синхронних генераторах.



Кузьмін Віктор Володимирович, професор, доктор технічних наук. Захистив диплом інженера, дисертації кандидата і доктора технічних наук в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини і апарати, відповідно в 1960, 1970 та 1984 рр. Наукові інтереси пов'язані з електроенергетикою та теоретичними основами електротехніки.

*Поступила в редколегію 07.12.2011
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*

В.І. МІШИН, д-р техн. наук, проф., НУБіП України, Київ
В.В. КАПЛУН, д-р техн. наук, доц., НУБіП України, Київ
Р.М. ЧУЄНКО, канд. техн. наук, доц., НУБіП України, Київ
В.В. ГАВРИЛЮК, аспірант, НУБіП України, Київ

ВЛАСТИВОСТІ КОМПЕНСОВАНИХ АСИНХРОННИХ МАШИН ІЗ СУМІЩЕНИМИ ОБМОТКАМИ СТАТОРА

Розглянуто принципові електричні схеми і властивості суміщених робочих і компенсуючих обмоток статора компенсованих асинхронних машин. Подані рекомендації щодо їх практичного використання.

Рассмотрены принципиальные электрические схемы и свойства совмещенных рабочих и компенсирующих обмоток статора компенсированных асинхронных машин. Даны рекомендации по их практическому использованию.

Вступ. Асинхронний двигун (АД) за техніко-економічними показниками, пусковими і робочими характеристиками, асинхронний генератор за зовнішніми характеристиками не задовольняють сучасним вимогам енергозбереження і якості продукції. Причиною цього зокрема є споживання асинхронною машиною (АМ) реактивної потужності. Класичні способи компенсації якої достатньою мірою не дозволяють підвищити енергоефективність АМ. На основі ефекту внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності [3] було запропоновано компенсовану асинхронну машину (КАМ) в якій на основі схемних рішень вдається досягти позитивного впливу на електромеханічні та електромагнітні процеси, і, як результат, підвищення її енергоефективності.

Метою дослідження є визначення властивостей компенсованих асинхронних машин із суміщеними обмотками статора.

Результати досліджень. Відомо, що напруга компенсуючого джерела і споживача по контуру електричного кола зустрічні одна одній. Тому ємнісний струм конденсаторів, випереджаючи свою напругу по фазі в часі на чверть періоду (90^0), при обміні реактивною енергією із споживачем стає по відношенню до нього відстаючим, індуктивним. Таким чином ємнісний струм системи переходить у споживач як струм його збудження. Але магнітне поле у споживачеві – феромагнітному пристрої (ф.у.) створюється сукупною дією всіх його струмів або МРС. При цьому активні складові струмів контурів взаємно врівноважені, а індуктивні створюють намагнічуючий струм, що збуджує основне ма-

гнітне поле.

На схемі рис. 1а елементи W_1 і W_2 представляють обмотки статора (W_1) і ротора (W_2) звичайного АД з короткозамкнутим ротором. При роботі АД на механічне навантаження струми статора $\dot{I}'_1$ і ротора $\dot{I}_2$ зв'язані між собою умовою рівності МРС як,

$$\dot{I}'_1 = \dot{I}'_0 - \dot{I}_2, \quad (1)$$

де $\dot{I}'_0$ – намагнічуючий струм двигуна (див. векторну діаграму рис. 1а).

При приведенні всіх обмоток АД до осі основної обмотки [2], рівних їх числах витків ($W_\Delta = W_1 = W_2$), при перетині єдиним обертовим магнітним потоком ЕРС обмоток однакові $\dot{E}_1 = \dot{E}_\Delta = \dot{E}_2$.

При ввімкненні цих обмоток між собою за схемою поворотного АТ на ємність C_Δ напруга на виході його

$$\dot{U}_{C\Delta} \approx \dot{E}_\Delta + \dot{E}_1 = 2\dot{E}_1 \sin \frac{\delta}{2} \cdot e^{j\frac{\delta}{2}}, \quad (2)$$

і струм

$$\dot{I}_\Delta = \frac{\dot{U}_{C\Delta}}{-jX_{C\Delta}} \quad (3)$$

із зміною просторового кута δ додаткової обмотки змінюються по фазі в часі на кут $\delta/2$ (рис. 1б, в) відносно їх при $\delta = 0$ за схемою рис. 1а. Загальний намагнічуючий струм (рис. 1а) з умови рівноваги МРС стає рівним $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta + \dot{I}_2$. Він випереджає взаємодуктивний (електромагнітний) зв'язок між обмотками за їх ЕРС

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_\Delta = \dot{E}_2 = -jX_m I_0, \quad (4)$$

де X_m – опір взаємної індукції або намагнічуючого контуру;

$X_{C\Delta} = \frac{1}{\omega C_\Delta}$ – ємнісний опір; $\omega = 2\pi f$; f – частота.

Ємнісний струм $\dot{I}_\Delta$ за схемою АТ рис. 1а має подвійний вплив на струми АД. Електричним зв'язком між обмотками він разом із струмом $\dot{I}_1$ основної обмотки статора АД створює його загальний струм $\dot{I} = \dot{I}_1 - \dot{I}_\Delta$, електромагнітно входить до складу намагнічуючого струму $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta + \dot{I}_2$, заміщує частину індуктивної складової струму основної обмотки $\dot{I}_1 = \dot{I}'_1 - \dot{I}_\Delta$, зменшуючи його величину і збільшую-

чи $\cos\varphi_1$. При цьому загальний струм $\dot{I} = \dot{I}_1 - \dot{I}_\Delta = \dot{I}'_1 - 2\dot{I}_\Delta$ може мати навіть випереджаючий характер (рис. 1а).

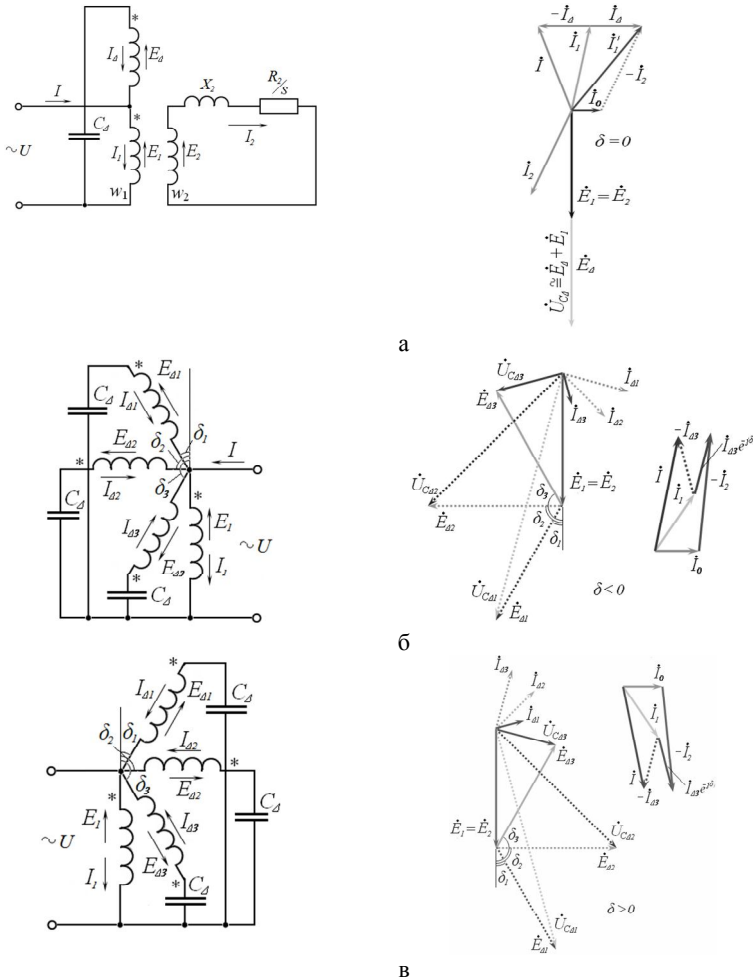


Рис. 1. Принципова електрична схема і фрагмент векторної діаграми фази статора КАМ при з'єднанні обмоток поворотного АТ в загальний вузол різноименними затискачами при $\delta=0$ (а), $\delta<0$ (б), $\delta>0$ (в), $\delta_k = \mp 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$.

Разом з тим підмагнічуюча дія ємнісного струму I_{Δ} дещо збільшує намагнічуючий струм, що збільшує магнітний потік і створені ним ЕРС $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$ обмоток статора і ротора.

Збільшення ЕРС E_2 короткозамкненого ротора є еквівалентним введенню в коло його (через статор!) деякої додаткової ЕРС $\dot{E}_{\Delta m} = -jX_m \dot{I}_{\Delta}$. З іншого боку збільшення ЕРС $\dot{E}_1$ основної обмотки статора, врівноваженої напругою $\dot{U}$ мережі, також веде до зниження струмів.

Двигун в деякій мірі стає енергозберігаючим, з підвищеним пусковим моментом. Такий асинхронний двигун з внутрішньою ємнісною компенсацією реактивній потужності називаємо компенсованим [6].

Проте додаткова обмотка статора (вторинна обмотка АТ за схемою рис. 1,а) є чисто компенсуючою і не несе активного навантаження, але займає певне місце в пазах статора, збільшуючи габарити і масу матеріалу машини. Якщо додаткову обмотку змістити в пазах сердечника статора відносно основної обмотки на деякий кут δ в напрямку обертання поля (рис. 1,б) або проти нього (рис. 1в), то вона перетинатиметься єдиним обертовим магнітним потоком пізніше або раніше основної обмотки на час проходження полем цього кутового шляху δ . ЕРС $\dot{E}_{\Delta}$ додаткової обмотки відставатиме в часі дії від ЕРС основної обмотки або випереджатиме її залежно від напрямку зміщення додаткової обмотки відносно основної. При однакових числах витків $W_{\Delta} = W_1$ обмоток зв'язок між їх ЕРС можна представити як

$$\dot{E}_{\Delta} = \dot{E}_1 e^{j\delta}, \quad (5)$$

де $e^{j\delta}$ – поворотний множник, а знак кута δ приймається за векторними діаграмами рис. 1б, в; при відставанні $\dot{E}_{\Delta}$ по фазі в часі від $\dot{E}_1$ (рис. 1б) $\delta < 0$, при випередженні (рис. 1в) $\delta > 0$.

Таким чином зміна просторової координати додаткової обмотки (вторинної обмотки поворотного АТ) на кут δ приводить до зміни в часі на кут $\delta/2$ її вихідної напруги $\dot{U}_{C\Delta}$ і струму $\dot{I}_{\Delta}$ незалежно від характеру електричного опору кола. Відомо, що в схемах пристроїв із співвісними обмотками фаза струму в часі залежить лише від характеру опорів, у схемах 1б, в її можна регулювати зміною не лише характеру навантаження, але й просторової координати хоча б однієї з взаєміндуктивних обмоток.

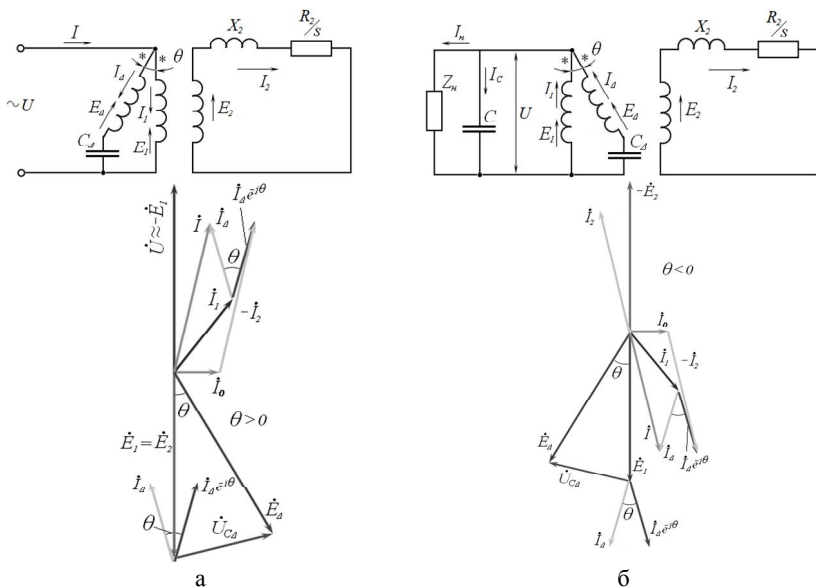


Рис. 2. Принципові електричні схеми і фрагмент векторних діаграм фази статора КАМ при з'єднанні обмоток поворотного АТ в загальний вузол однойменними затискачами $\theta > 0$ (а), $\theta < 0$ (б). $\theta = \mp 30^\circ$.

Так, при $\delta \neq 0$ за рис. 1,б, в ємнісний по суті струм $\dot{I}_\Delta$ вторинного кола АТ векторно не перпендикулярний векторам напруг $\dot{U} \approx -\dot{E}_1$ основної обмотки і $\dot{U}_\Delta \approx -\dot{E}_\Delta$ вторинної обмотки, тобто по відношенню до них має як реактивну так і активну складові. На відміну від схеми рис. 1,а (при $\delta=0$) обидві обмотки поворотного АТ можуть нести активне і реактивне навантаження, причому активні складові струмів $\dot{I}_1$ і $\dot{I}_\Delta$ одного напрямку, а реактивні зустрічні, струм $\dot{I}_1$ основної обмотки є активно-індуктивним, а струм $\dot{I}_\Delta$ додаткової (вторинної обмотки АТ) активно-ємнісним.

Кут δ може бути будь-яким в межах $0 \dots 2\pi$, пропорційним пазовому куту. Його величина вибирається залежно від необхідного співвідношення за розподілом величин активних і реактивних потужностей між обмотками і інших сприятливих параметрів, знак $\pm \delta$ приймається за заданим режимом роботи КАМ: $\delta < 0$ в режимі КАД [6] (рис. 1,б); $\delta > 0$ (рис. 1в) для КАГ. На рис. 1,б,в приведені принципові елект-

ричні схеми і векторні діаграми відповідних режимів при $\delta = \pm 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ$ і діаграми струмів з умови рівноваги їх МРС

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\cdot\theta} = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \quad (6)$$

при загальному струмі, де $\dot{I}_\Delta e^{-j\cdot\theta}$ – струм вторинної обмотки АТ, приведеної до осі основної обмотки.

Такі ж результати за величинами струмів та властивостями дає схема компенсованої асинхронної машини, у якій обмотки статора з'єднані в загальний вузол однойменними затискачами, представляючи поворотний АТ, ввімкнений на електричну ємність C_Δ (рис. 2). У зв'язку із зміною в схемі рис.2 положення по відношенню до основної обмотки затискачів вторинної обмотки АТ змінюється на 180° фаза її ЕРС $\dot{E}_\Delta$ і струму $\dot{I}_\Delta$ на виході АТ. Загальний струм КАМ представиться як $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$ намагнічуючий струм буде рівний $\dot{I}_0 = \dot{I}_\Delta + \dot{I}_1 e^{-j\cdot\theta} + \dot{I}_2$, напруга на виході АТ $\dot{U}_{C\Delta} \approx \dot{E}_\Delta - \dot{E}_1$.

Кут θ між обмотками поворотного АТ теж може бути будь-яким в межах $0 \dots 2\pi$, але при однакових величинах $\dot{E}_\Delta$ і $\dot{I}_\Delta$ за схемами рис. 1 та 2 кути δ і θ повинні бути зв'язані між собою як $\delta = \pm 180^\circ + \theta$, де для режиму КАД $\delta > 0$ або $\delta = -180^\circ + \theta$, в режимі генератора $\delta < 0$ і $\delta = 180^\circ + \theta$.

При переводі з режиму двигуна (КАД) в генераторний (КАГ) необхідно змінити знаки не тільки ковзання S [4, 3], але й θ [4, 8]; для КАД $S > 0, \theta > 0$, в генератора $S < 0, \theta < 0$.

Висновки. В компенсованих асинхронних машинах слід віддати перевагу для схем рис. 2, які при однакових результатах конструктивно простіші за схеми рис. 1, з'єднання обмоток в загальний вузол однойменними затискачами забезпечує однакові напрями струмів в обмотках, що спрощує розрахунок і аналіз процесів, загальний струм КАМ знаходиться як сума $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$, а не різниця струмів.

Внутрішня ємнісна компенсація в компенсованих асинхронних машинах при функціональному поєднанні обмоток статора як робочих і компенсуючих, ввімкнених за схемою поворотного АТ на електричну ємність, проявляє свою дію в наступних ефектах:

– збільшення пускового струму ротора і його пускового моменту. Так для КАД із зростанням пускового струму ротора на 5 – 10% в порівнянні з базовим АД пусковий момент його зростає на 15 – 20% [3, 7].

– зменшення робочих струмів на 8 – 10%, що призводить до зниження в обмотках на 10 – 15% як активної, так і реактивної потужностей при його $\cos\phi \approx 0,95 \dots 0,99$;

– підвищення жорсткості зовнішньої характеристики компенсованого асинхронного генератора (КААГ) зумовлює стабілізацію рівня вихідної напруги і частоти генератора із зростанням навантаження [4, 8].

– подвоєння числа фаз і фазних зон обмотки вдвічі зменшує число пазів на полюс і її фазу [1], зменшує МРС і намагнічуючий струм для створення заданого потоку і ЕРС. При $\alpha - \theta = 0$ хвилі МРС співпадають по першій (основній) гармоніці, але вищі просторові гармоніки $\nu = 2mk \pm 1$ зміщені в них на кут $\gamma = \alpha - \nu\theta$. Найбільш шкідливі в трифазній машині гармоніки зворотна $\nu = -5$ і пряма $\nu = 7$ взаємно компенсуються і не мають місця в загальній хвилі МРС.

Список літератури: 1. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2006. – 607 с. 2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001. – 327 с. 3. Мишин В.И., Чуенко Р.Н., Гаврилюк В.В. Эффект внутренней емкостной компенсации реактивной мощности в асинхронном электродвигателе // Электротехника. – 2009. – №8. – С. 30-36. 4. Мишин В.И., Каплун В.В., Макаревич С.С. Автономные асинхронные генераторы повышенной эффективности // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2006. – № 2-4. – С. 41-51. 5. Патент України № 51814 7 Н02К Бюл, №6. 2002 Асинхронний електродвигун (Мішин В.І., Чуєнко Р.М. та ін.). 6. Патент України № 56330 7 Н02К Бюл, №15. 2003 Трифазний асинхронний електродвигун (Мішин В.І., Чуєнко Р.М. та ін.). 7. Патент України № 84049 А Н02К Бюл, №7. 2004 Асинхронний електродвигун (Мішин В.І., Кафтан Б.М. та ін.). 8. Патент України № 83730 7 С2 Н02К Бюл. №15. 2008 Автономний асинхронний генератор (Мішин В.І., Каплун В.В. та ін.).

*Поступила в редколлегию 02.11.2011
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*

И.А. ЦОДИК, канд. техн. наук, доц., ДонГТУ, Алчевск
К.В. ХУДОБИН, аспирант, ДонГТУ, Алчевск
О.В. БАКАЕВ, старший преподаватель, ДонГТУ, Алчевск

ИСПЫТАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В МНОГОСКОРОСТНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ.

Проведено випробування асинхронного двигуна в багатшвидкісному електроприводі, який живиться від спеціального пристрою регулювання швидкості і зроблена оцінка працездатності приводу на двох частотах обертання.

Проведено испытание асинхронного двигателя в многоскоростном электроприводе, который питается от специального устройства регулирования скорости и произведена оценка работоспособности привода на двух частотах вращения.

Введение. В настоящее время имеется ряд механизмов, в которых необходимо иметь привод с двумя скоростями вращения. Основной скорости, при которой привод работает большую часть времени и вспомогательной. Скорости должны отличаться в три и более раз. К таким механизмам относятся, например, шахтные скребковые конвейеры, где вспомогательная скорость нужна для транспортировки технологических грузов, например леса.

В этом случае применение преобразователя частоты для получения пониженной скорости вращения двигателя является экономически не целесообразным.

Применение двухскоростного двигателя с двумя обмотками на статоре приводит к значительному удорожанию двигателя. Так по данным завода-изготовителя двигателей для угольной промышленности ПЭМЗ им. К.Маркса двухскоростной асинхронный двигатель 3В 225М4 мощностью 55/11 кВт на скорости 1500/500 об/мин более чем в два раза дороже асинхронного односкоростного двигателя мощностью 55 кВт, частотой вращения 1500 об/мин.

Следовательно, представляет интерес создание двухскоростного привода с использованием простого, недорогого устройства. Такое устройство может быть получено на основе по фазного переключения статорных обмоток двигателя. Такой способ регулирования, скорости вращения можно отнести к известным в литературе методам под на-

званием квазичастотного регулирования или регулирования с использованием циклоконвертеров.

Цель работы – определить характеристики асинхронного двигателя при питании его по предлагаемому принципу.

Описание макетного образца привода. Схема включения асинхронного двигателя приведена на рис.1. Здесь: 1 – асинхронный двигатель, 2, 3, 4 – коммутаторы (симисторы), которые включены в фазы обмоток статора. Напряжение, подаваемое на каждую фазу обмотки

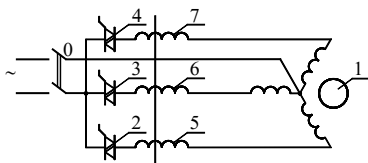


Рис.1. Общая схема включения асинхронного двигателя.

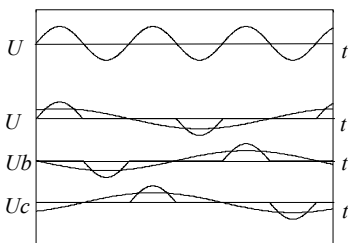


Рис.2. График изменения напряжения, питающего двигатель.

статора, формируется коммутатором и подается на нее в течение одного полупериода питающего однофазного напряжения.

На рис. 2. приведены графики изменения напряжения на фазах обмотки статора при работе устройства.

Нетрудно видеть, что на каждой фазе формируются напряжение, которое содержит основную гармонику, частота которой в три раза меньше частоты сети. Из рис. 2 видно, что основные гармоники в фазах сдвинуты на 120 градусов.

Кроме основной, кривая напряжения содержит и высшие гармоники. Наиболее нежелательные из них гармоники кратные трем. Для подавления таких гармоник применяется фильтр, который представляет собой магнитопровод

с тремя обмотками. Все три обмотки находятся на одном стержне. Для уменьшения индуктивного сопротивления рассеяния магнитопровод сконструирован таким образом, чтобы можно было регулировать зазор, что позволяет регулировать индуктивное сопротивление для третьей гармоники. Вольтамперная характеристика фильтра приведена рис. 3. Характеристика 1 – соответствует магнитопроводу без зазора, а характеристика 2 – магнитопроводу с зазором 2 мм.

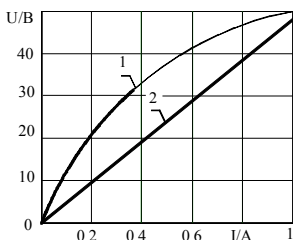


Рис. 3. Вольт – амперные характеристики фильтра.

Для испытаний использовался двигатель АОЛ-22-4, со следующими техническими характеристиками: Номинальная мощность – 400 Вт, Напряжение – 220/380 В, Частота вращения ротора – 1400 об/мин, КПД – 10 %, Коэффициент мощности – 0,76 о.е.

Результаты испытаний. На рис. 4 и 5 приведены рабочие характеристики двигателя.

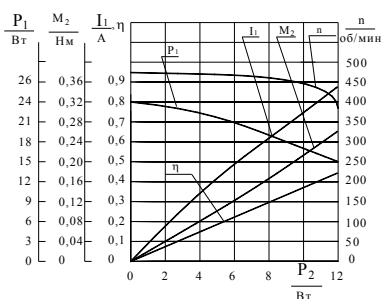


Рис.4. Рабочие характеристики с фильтром без зазора.

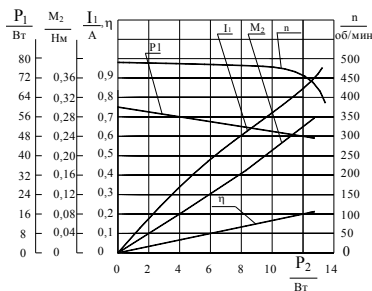


Рис.5. Рабочие характеристики с фильтром с зазором.

Для сравнения на рис. 6 приведены механические характеристики двигателя при работе с фильтром без зазора (характеристика 1) и с зазором (характеристика 2).

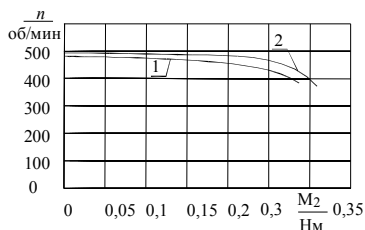


Рис.6. Механическая характеристика.

Были сняты осциллограммы токов асинхронного двигателя. На рис. 7,8 спектральный состав тока на холостом ходу и под нагрузкой. Сплошная кривая соответствует фильтру без зазора, пунктирная с зазором.

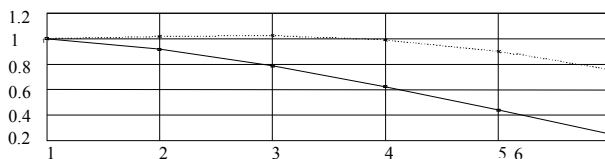


Рис. 7. Спектральный состав токов на холостом ходу.

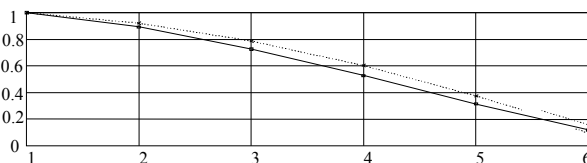


Рис. 8. Спектральный состав токов под нагрузкой.

Анализ результатов испытаний. Применение фильтра значительно ограничило высшие гармоники, что позволило получить приемлемый уровень потерь. Одновременно за счет применения фильтра снижается напряжение на зажимах двигателя, поэтому для повышения отдаваемой мощности можно повысить напряжение на приводе, включив его на линейное напряжение. Введение воздушного зазора привело к росту доли высших гармоник на холостом ходу, но при работе под нагрузкой эта разница незначительная.

Выводы: 1. В процессе испытаний подтверждена принципиальная возможность получения более низкой скорости за счет переключения фаз. 2. Привод с такой системой управления будет иметь приемлемые характеристики. 3. В дальнейших исследованиях необходимо определить оптимальные параметры фильтра и параметры управляющих импульсов.

Список литературы: 1. *Фираго Б.И.* Непосредственные преобразователи частоты в электроприводе. — Мн.: Университетское, 1990. — 255 с. 2. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами / *Л.П. Петров., В.А. Ладензон, М.П. Обуховский, Р.Г. Подзол* // Энергия, 1970. — 128 с.



Цодик Игорь Абрамович, канд. техн. наук, доцент кафедры "Электрические машины и аппараты" ДонГТУ. Защитил диплом инженера в ДонГТУ по специальности "Электрические машины и аппараты" в 1972 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 1983 г.



Худобин Константин Викторович, аспирант кафедры электрических машин и аппаратов "ЭМА", Донбасского Государственного технического университета. Защитил диплом инженера в ДонГТУ по специальности "Электрические машины и аппараты" в 2009 г.



Бакаев Олег Викторович, старший преподаватель кафедры специализированных компьютерных систем "СКС" Донбасского Государственного технического университета. Защитил диплом инженера в ХИРЭ Харьковский институт радиоэлектроники по специальности "Инженер системно-техник" в 1979 г. Директор государственного научно производственного предприятия "ФОТОН".

*Поступила в редколлегию 26.10.2011
Рецензент д.т.н., проф. Милых В.И.*

Ю.В. БАТЫГИН, д-р. техн. наук, проф., зав. каф., ХНАДУ, Харьков

А.В. ГНАТОВ, канд. техн. наук, доц., ХНАДУ, Харьков

Щ.В. ГНАТОВА, аспирант, ХНАДУ, Харьков

Е.А. ЧАПЛЫГИН, канд. техн. наук, доцент, ХНАДУ, Харьков

ПЕРЕХОДНОЙ ПРОЦЕСС ПРИ РАЗРЯДЕ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ В МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКЕ

В статті проведений аналіз впливу параметрів зарядного кола на перехідні процеси, що протікають в магнітно-імпульсній установці при розряді ємнісного накопичувача. Отримано аналітичні співвідношення для розрахунку розрядного струму. Досліджено вплив активного опору і індуктивності зарядного контуру на електромагнітні процеси, що протікають при розряді. Обґрунтовано пропозицію вилучення комутатора із зарядного кола.

В статье проведен анализ влияния параметров зарядной цепи на переходные процессы, протекающие в магнитно-импульсной установке при разряде емкостного накопителя. Получены аналитические соотношения для расчета разрядного тока. Исследовано влияние активного сопротивления и индуктивности зарядного контура на протекающие электромагнитные процессы при разряде. Обосновано предложение убрать коммутатор из зарядной цепи.

Введение. Методы магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) позволяют решить довольно многочисленный перечень задач современного промышленного производства в авиа и автомобилестроении. К таковым относятся, например, магнитно-импульсные штамповка профилей из металлических сплавов, жесткое сочленение сборных конструкций, внешняя рихтовка металлических поверхностей с вмятинами и др. [1, 2, 3].

Существующие схемы МИОМ, как правило, работают в режиме однократного силового воздействия на обрабатываемый объект [3, 4]. Здесь невозможно контролировать процесс обработки, необходимы громоздкие источники мощности, требуются существенные затраты на создание комплекса оборудования в целом и др.

Идея, предложенная авторами [4, 5] и положенная в основу источника мощности (магнитно-импульсной установки – МИУ) для магнитно-импульсной технологии состоит в замене мощного однократного силового воздействия серией довольно малых импульсов, суммар-

ное действие которых должно быть достаточным для достижения заданного уровня деформирования объекта обработки, то есть реализации соответствующей технологической задачи [4, 5].

Конкретная техническая реализация предлагаемой идеи может осуществляться с помощью схемы на рис. 1, где приведена принципиальная схема магнитно-импульсного комплекса для работы в режиме многократно повторяющихся импульсов силового воздействия: R_1 – токоограничивающий резистор зарядного контура, R_2, L_2 – эквивалентные активное сопротивление и индуктивность разрядного контура.

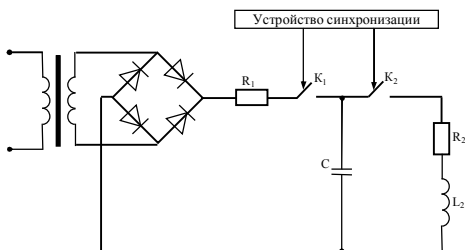


Рис. 1. Принципиальная схема магнитно-импульсного комплекса.

Устройство синхронизации осуществляет автоматически повторяющиеся заряд (коммутатор K_1 – замкнут, K_2 – разомкнут) и разряд (коммутатор K_1 – разомкнут, K_2 – замкнут) емкостного накопителя на нагрузку – индукторную систему, подключаемую к

электрическому выходу собственно магнитно-импульсной установки.

Как представляется из априорных соображений, ключ – K_1 можно исключить из схемы. Это позволит, как минимум в два раза, снизить стоимость блока синхронизации и управления. Включение дополнительных элементов в зарядный контур магнитно-импульсного комплекса (рис. 2) дополнительная индуктивность – L_1 и резистор – R_1 должны ограничить протекание разрядного тока вне цепи, где подключается инструмент-индуктор – L_2, R_2 .

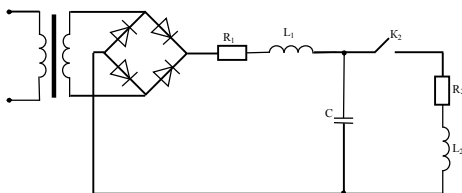


Рис. 2. Включение дополнительных элементов в зарядный контур магнитно-импульсного комплекса.

Смысл данного предложения можно оценить с помощью простейших вычислений.

Цель настоящей работы – оценка действенности сформулированного предложения по замене ключа, прерывающего процесс заряда емкостного накопителя по достижении требуемого напряжения, соответствующими резистором и индуктивностью, а также выбор их величин, обеспечивающих максимум эффективности магнитно-импульсного комплекса в целом.

В отсутствие коммутатора – K_1 и наличии элементов – L_1 и R_1 разряд емкости C будет происходить согласно схеме замещения на рис. 3 (ключ K_2 – замкнут).

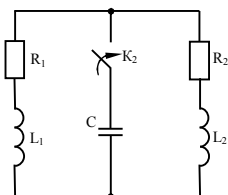


Рис. 3. Схема емкостного накопителя.

Проведение расчета предполагает, что в момент включения коммутатора K_2 напряжение на емкости $U_c(0) = U_{c0}$, токи в контурах с элементами R_1, L_1 и с элементами R_2, L_2 , соответственно, равны нулю, то есть, $J_1(0) = J_2(0) = 0$ (рис. 3).

Все вычисления проведем с помощью интегрального преобразования Лапласа [6].

В пространстве изображений по Лапласу система дифференциальных уравнений, описывающая переходной процесс в рассматриваемой схеме замещения, имеет вид [7]:

$$\begin{cases} J_1(p) \cdot (pL_1 + R_1) = -U_c(p), \\ J_2(p) \cdot (pL_2 + R_2) = -U_c(p), \\ J_1(p) + J_2(p) = C \cdot (pU_c(p) - U_{c0}), \end{cases} \quad (1)$$

где $J_{1,2}(p) = L \{ J_{1,2}(t) \}$, $U_c(p) = L \{ U_c(t) \}$.

В конечном итоге нас интересует ток в цепи нагрузки, то есть, ток в индукторной системе – $J_2(t)$.

Из системы (1) находим, что

$$J_2(p) = -C \cdot U_{c0} \cdot \frac{pL_1 + R_1}{A_3 \cdot p^3 + A_2 \cdot p^2 + A_1 \cdot p + A_0}, \quad (2)$$

где $A_3 = C \cdot L_1 \cdot L_2$, $A_2 = C \cdot (R_1 \cdot L_2 + R_2 \cdot L_1)$,

$A_1 = C \cdot R_1 \cdot R_2 + (L_1 + L_2)$, $A_0 = (R_1 + R_2)$.

Выражение (2) можно упростить, если оценить коэффициенты – $A_{0,1,2,3}$.

Подставляя численные значения реально возможных величин элементов схемы, получаем, что $A_3 \ll A_{2,1,0}$, то есть, $A_3 \rightarrow 0$.

Пренебрегая слагаемым третьего порядка в знаменателе дроби, перепишем зависимость для L – образа разрядного тока.

Строго говоря, и это очевидно априори, данное упрощение искажает временную форму разрядного импульса только в его начальной фазе, то есть, в окрестности нуля.

После необходимых преобразований и введения новых обозначений получаем, что

$$J_2(p) \approx - \frac{U_{c0}}{\left(R_1 \cdot \frac{L_2}{L_1} + R_2\right)} \cdot \frac{\left(p + \frac{R_1}{L_1}\right)}{p^2 + 2\delta \cdot p + \omega_0^2}, \quad (3)$$

где $\delta = \frac{R_1 \cdot R_2 + \frac{(L_1 + L_2)}{C}}{2 \cdot (R_1 \cdot L_2 + R_2 \cdot L_1)}$, $\omega_0 = \sqrt{\frac{(R_1 + R_2)}{C \cdot (R_1 \cdot L_2 + R_2 \cdot L_1)}}$.

Выполним в (3) обратное преобразование Лапласа.

Введем величину – ω^2 :

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \delta^2. \quad (4)$$

Выражение (3) с учетом (4) запишется в виде:

$$J_2(p) \approx - \frac{U_{c0}}{\left(R_1 \cdot \frac{L_2}{L_1} + R_2\right)} \cdot \frac{(p + \delta) + \left(\frac{R_1}{L_1} - \delta\right)}{(p + \delta)^2 + \omega^2}. \quad (5)$$

Вид оригинала в (5) определяется величиной ω^2 .

При $\omega^2 > 0$,

$$J_2(t) \approx - \frac{U_{c0}}{\left(R_1 \cdot \frac{L_2}{L_1} + R_2\right)} \cdot e^{-\delta t} \left[\cos(\omega \cdot t) + \frac{\left(\frac{R_1}{L_1} - \delta\right)}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \right]. \quad (6)$$

При $\omega^2 < 0$,

$$J_2(t) \approx - \frac{U_{c0}}{\left(R_1 \cdot \frac{L_2}{L_1} + R_2\right)} \cdot e^{-\delta t} \left[\operatorname{ch}(\omega \cdot t) + \frac{\left(\frac{R_1}{L_1} - \delta\right)}{\omega} \cdot \operatorname{sh}(\omega \cdot t) \right]. \quad (7)$$

Выражение (6) соответствует колебательному характеру разрядного тока, (7) – аperiodическому.

Соотношение (4) и выражения для разрядного тока запишем в виде, удобном для проведения вычислений.

$$\text{При } 2 \cdot \sqrt{\frac{(R_1 L_2 + R_2 L_1)}{C}} > \frac{R_1 \cdot R_2}{\sqrt{R_1 + R_2}},$$

$$J_2(\varphi) \approx -\frac{U_{c0}}{\left(R_1 \cdot \frac{L_2}{L_1} + R_2\right)} \cdot e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \left[\cos(\varphi) + \frac{\left(\frac{R_1}{L_1} - \delta\right)}{\omega} \cdot \sin(\varphi) \right], \quad (8)$$

где $\delta_0 = \frac{\delta}{\omega}$ – относительный декремент затухания разрядного тока, $\varphi = \omega \cdot t$ – фаза сигнала.

$$\text{При } 2 \cdot \sqrt{\frac{(R_1 L_2 + R_2 L_1)}{C}} < \frac{R_1 \cdot R_2}{\sqrt{R_1 + R_2}},$$

$$J_2(\varphi) \approx -\frac{U_{c0}}{\left(R_1 \cdot \frac{L_2}{L_1} + R_2\right)} \cdot e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \left[\text{ch}(\varphi) + \frac{\left(\frac{R_1}{L_1} - \delta\right)}{\omega} \cdot \text{sh}(\varphi) \right]. \quad (9)$$

Количественно характеризовать протекающие процессы можно с помощью средней энергии магнитного поля, поступающей обмотку индукторной системы за период разрядного тока.

По определению, данный энергетический показатель определяется соотношением:

$$\overline{W} = \frac{L_2}{2} \cdot \left(\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} J_2^2(\varphi) \cdot d\varphi \right). \quad (10)$$

Сравнение значений $\overline{W}$ при вариации величин элементов схемы замещения на рис. 3 позволит провести количественное сравнение эффективности передачи энергии емкостного накопителя в обмотку индукторной системы.

Выполним некоторые численные оценки.

В качестве параметров схемы возьмем их типичные значения [4]: $C = 1200 \cdot 10^{-6}$ Ф, $R_2 = 0,02094$ Ом, $L_2 = 6,0 \cdot 10^{-6}$ Гн, $U_{c0} = 1$ кВ. Величины R_1 и L_1 варьируются.

Результаты вычислений представлены ниже: расчетная фазовая зависимость для разрядного тока при работе коммутатора – K_1 , $f = 1855$ кГц, $\delta_0 = 0,149$ (рис. 4); расчетная фазовая зависимость для разрядного тока в отсутствие коммутатора – K_1 , $R_1 = R_2$, $L_1 = 0$, $f = 2196$ Гц, $\delta_0 = 1,57$ (рис. 5).

Представленные кривые характеризуют процесс разряда в двух "предельных" ситуациях.

Первая – коммутатор K_1 полностью отключает цепь заряда (рис. 4). Априори очевидно, что энергия, передаваемая в нагрузку – максимальна, поскольку емкость разряжается исключительно на обмотку индукторной системы. Процесс имеет колебательный характер. Вычисления по формуле (10) дают, что $\overline{W}_1 = 135$ Дж.

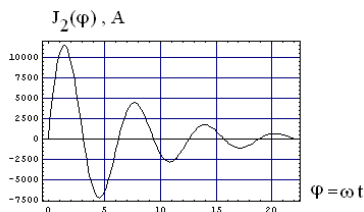


Рис. 4. Фазовая зависимость при работе коммутатора.

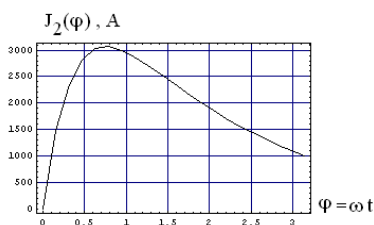


Рис. 5. Фазовая зависимость в отсутствие коммутатора.

Вторая – коммутатор K_1 отсутствует (рис. 5). Разряд происходит на два параллельных контура, один из которых есть ветвь с подключенной индукторной системой, а второй – ветвь, с элементами – R_1, L_1 , значения которых являются наименьшими из реально возможных. Процесс имеет строго аperiodический характер. Вычисления по формуле (10) дают, что $\overline{W}_2 = 3$ Дж.

Сравнение результатов показывает, что полное отключение элементов зарядной цепи (наличие коммутатора K_1) существенно увеличивает эффективность передачи энергии в нагрузку. Так, отношение энергетических показателей составляет $\frac{\overline{W}_2}{\overline{W}_1} \approx 0,022$. То есть, в отсутствие коммутатора K_1 , в цепь обмотки индукторной системы поступает менее $\sim 3\%$ максимально возможной энергии.

Далее, проанализируем влияние сопротивления R_1 . На рис.6 представлена расчетная фазовая зависимость для разрядного тока в отсутствие коммутатора – K_1 , $R_1 = 10 \cdot R_2$, $L_1 = 0$, $f = 1876$ Гц, $\delta_0 = 0,32$, а на рис. 7 расчетная фазовая зависимость для разрядного тока в отсутствие коммутатора – K_1 , $R_1 = 500 \cdot R_2 \approx 10,94$ Ом, $L_1 \approx 0$, $f = 1856$ Гц, $\delta_0 = 0,15$.

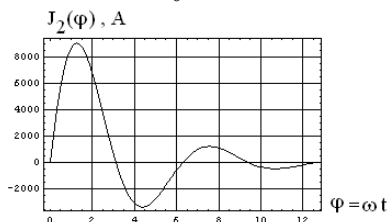


Рис. 6. Расчетная фазовая зависимость при $R_1 = 10 \cdot R_2$.

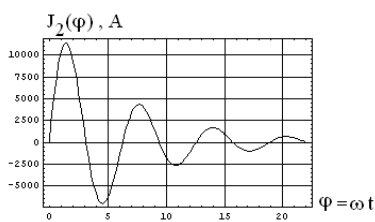


Рис. 7. Расчетная фазовая зависимость при $R_1 = 500 \cdot R_2$.

Как следует из представленных выше результатов вычислений, увеличение сопротивления в зарядном контуре приближает характеристики процесса в контуре с индукторной системой к ситуации, когда имело место отключение левой ветви на схеме рис. 3 с помощью коммутатора K_1 . Так уже при $R_1 = 10 \cdot R_2 = 0,2094$ Ом (рис. 6) процесс приобретает колебательный характер. Энергетический показатель – $\bar{W}_3 = 67$ Дж, что составляет $\sim 50\%$ от возможного максимума.

При $R_1 = 500 \cdot R_2 = 10,47$ Ом (рис. 7) колебательный характер процесса сохраняется. Энергетический показатель приближается к "идеалу" и составляет $\bar{W}_4 = 133$ Дж, то есть, уже $\sim 99\%$ от максимума возможного.

Физически, резистор R_1 в какой-то мере играет роль коммутатора K_1 . В зависимости от величины R_1 левая ветвь в схеме замещения на рис. 3 отключается менее или более эффективно. Этот факт и определяет значение энергии, передаваемой в обмотку индукторной системы. Очевидно, что значение $R_1 = 10,47$ Ом по действительности эквивалентно работе коммутатора K_1 .

Интересно отметить, что в рассматриваемой схеме, данному значению $R_1 = 10,47$ Ом соответствует постоянная заряда – $\tau = R_1 \cdot C \approx 0,12$ с. Это означает, что в режиме многократного повторения разрядных импульсов источник мощности может работать с частотой $\sim 1/3\tau \approx 3$ Гц. При желании увеличить частоту повторения в ~ 4 раза, то есть, довести до ~ 12 Гц, необходимо взять $R_1 \approx 2,6$ Ом. В этом случае придется несколько

пожертвовать величиной энергии, передаваемой в обмотку индукторной системы. Энергетический показатель составит $\overline{W} = 126$ Дж. В процентах – это $\sim 95\%$ от максимума возможного.

Обратимся к анализу влияния индуктивности L_1 .

Как показывают вычисления (рис. 8 – расчетная фазовая зависимость для разрядного тока в отсутствие коммутатора – $K_1, R_1 = 10 \cdot R_2$, $L_1 = L_2$, $f = 1683$ Гц, $\delta_0 = 0,49$ и рис. 9 – расчетная фазовая зависимость для разрядного тока в отсутствие коммутатора – $K_1, R_1 = 10 \cdot R_2$, $L_1 = 2 \cdot L_2$, $f = 1470$ Гц, $\delta_0 = 0,69$), введение индуктивности L_1 приводит изменению характера процесса. С увеличением последней форма тока от колебательной трансформируется в аperiodическую. Энергетические показатели для графиков на рис. 8 и рис. 9 будут составлять $\overline{W} \approx 45.5...37$ Дж, соответственно. В отношении к возможному максимуму – это $\sim 34...28\%$.

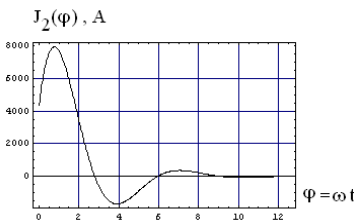


Рис. 8. Расчетная фазовая зависимость при $L_1 = L_2$.

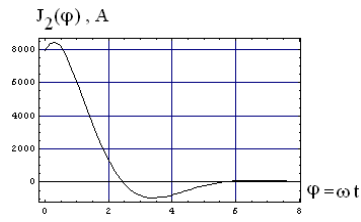


Рис. 9. Расчетная фазовая зависимость при $L_1 = 2L_2$.

Таким образом, индуктивность в зарядной цепи практически влияет только на форму тока. Значения энергетических показателей падают. Проведенное рассмотрение не учитывало влияние источника зарядного напряжения на протекающие процессы. Вторичную обмотку трансформатора на принципиальной схеме рис. 2 аппроксимируем источником постоянного напряжения – E и введем его в схему замещения на рис. 3 последовательно элементам R_1, L_1 . Поскольку индуктив-

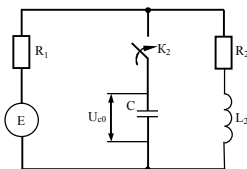


Рис. 10. Схема замещения.

ность в зарядной цепи не представляет практического интереса, исключим ее из рассмотрения. В конечном итоге, расчетная схема замещения принимает вид, показанный на рис. 10.

Система дифференциальных уравнений, описывающая переходной процесс, принимает вид [7]:

$$\begin{cases} J_1(p) \cdot R_1 - \frac{E}{p} = -U_c(p), \\ J_2(p) \cdot (pL_2 + R_2) = -U_c(p), \\ J_1(p) + J_2(p) = C \cdot (pU_c(p) - U_{c0}). \end{cases} \quad (11)$$

где $J_{1,2}(p) = L\{J_{1,2}(t)\}$, $U_c(p) = L\{U_c(t)\}$.

Нас интересует ток в цепи нагрузки, то есть, ток в индукторной системе – $J_2(t)$ – ?

Из системы (11) аналогично тому, как это было сделано ранее, можно получить, что

$$J_2(p) = \frac{1}{(p + \delta)^2 + \omega_0^2} \cdot \left(\frac{U_{c0}}{L_2} - \frac{1}{p} \cdot \frac{E}{(R_1 \cdot L_2 \cdot C)} \right), \quad (12)$$

$$\text{где } \delta = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_2}{L_2} + \frac{1}{R_1 \cdot C} \right), \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_2 \cdot C} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)}.$$

Оригинал выражения (12), соответствующий колебательному режиму, запишем в виде суммы двух функций [6]:

$$J_2(\varphi) = J_2^{(1)}(\varphi) + J_2^{(2)}(\varphi), \quad (13)$$

где $J_2^{(1)}(\varphi) = \frac{U_{c0}}{(\omega L_2)} \cdot e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \cdot \sin \varphi$ – составляющая тока в обмотке индуктора, обусловленная собственно разрядом емкости, $\varphi = \omega \cdot t$ – фаза, $\delta_0 = \delta / \omega$,

$$J_2^{(2)}(\varphi) = -\frac{E}{R_1(\omega L_2)(\omega C)(1 + \delta_0^2)} \cdot \left[1 - e^{-\delta_0 \cdot \varphi} (\cos \varphi + \delta_0 \sin \varphi) \right] \quad - \text{ со-}$$

ставляющая тока в обмотке индуктора, обусловленная действием источника зарядного напряжения.

Численные оценки по формуле (13) проведем для наиболее интересного случая в предыдущих вычислениях: $C = 1200 \cdot 10^{-6}$ Ф, $R_2 = 0,02094$ Ом, $L_2 = 6,0 \cdot 10^{-6}$ Гн, $R_1 \approx 2,6$ Ом и $E = U_{c0} = 1$ кВ.

Результаты расчетов представлены ниже. На рис. 11 представлена расчетная фазовая зависимость для составляющей тока, обусловленной разрядом емкости $f = 1858$ Гц, $\delta_0 = 0,16$, а на рис. 12 – расчетная фазовая зависимость для составляющей тока, обусловленной действием источника зарядного напряжения.

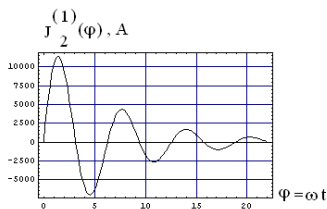


Рис. 11. Фазовая зависимость, обусловленная разрядом емкости.

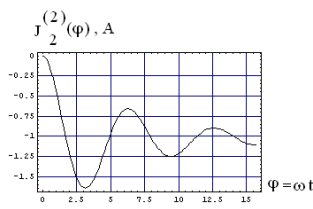


Рис.12. Фазовая зависимость, обусловленная источником напряжения.

Сравнение зависимостей на рис. 11 и рис. 12 показывает, что в обмотке индукторной системы преобладающей является составляющая тока, обусловленная разрядом емкостного накопителя, а составляющей, обусловленной действием источника, можно пренебречь.

Выводы. Введение активного сопротивления в зарядную цепь источника мощности позволяет: ограничить зарядный ток, достигнуть требуемой частоты повторения разрядных импульсов, исключить из схемы коммутатор, отключающий зарядную цепь при разряде емкостного накопителя на нагрузку, и минимизировать потери энергии, передаваемой в обмотку индукторной системы.

2. Введение индуктивности в зарядную цепь источника мощности малоэффективно, ее ощутимое влияние проявляется лишь в формировании временной формы разрядного импульса.

3. При разряде емкости на обмотку индукторной системы действие подключенного источника зарядного напряжения пренебрежимо мало, что позволяет использовать в схеме магнитно-импульсного комплекса только один коммутатор K_2 .

Приведенный анализ переходных процессов в рассматриваемой установке имеет ограниченный характер, т.е. здесь не учитываются особенности (характеристики) цепи питания, к которой подключается исследуемая установка.

Список литературы: 1. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31-April 1, 2004. – Dortmund, Germany. – P.157-160. 2. Батыгин Ю.В., Головащенко С.Ф., Гнатов А.В. и др. Индукторные системы для магнитно-импульсной раздачи труб с прямоугольной формой поперечного сечения //Электротехника і електромеханіка. – 2010. – №1. – С. 33-36. 3. Батыгин Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий // Винахідник та раціоналізатор. – 2007. – №5. – С.8-11. 4. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Теория и эксперимент магнитно-импульсного притяжения тонкостенных металлов. – Харьков: Изд. ХНАДУ, 2009. – 245с. 5. Батигін Ю.В., Бондаренко О.Ю.,

Гнатов А.В. та ін. Генератор багаторазових імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів. Патент України на корисну модель № 44933. 26.10.2009. Бюл.№20. **6.** Дж. Мэтьюз, Р.Уокер Математические методы физики. – М: Атомиздат, 1972. – 399 с. **7.** Атабеков Г.И. Основы теории цепей. – М: Энергия, 1969. – 450 с.



Батыгин Юрий Викторович – профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера, диссертации кандидата и доктора технических наук, последнюю в Харьковском политехническом институте по специальности техника сильных электрических и магнитных полей, соответственно в 1972, 1977, 1993 гг. Заведующий кафедрой "Физика" Харьковского национального автомобильно-дорожного университета с 2009 г.

Основные направления научной деятельности: магнитно-импульсная обработка листовых металлов.



Гнатов Андрей Викторович – доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера, диссертацию кандидата технических наук в Харьковском военном университете по специальности вооружение и военная техника, соответственно в 1998, 2004 гг. Доцент кафедры "Автомобильная электроника" Харьковского национального автомобильно-дорожного университета.

Основные направления научной деятельности: магнитно-импульсная обработка листовых металлов.



Гнатова Щасяня Валиковна – Защитила диплом инженера в Национальном техническом университете "ХПИ" по специальности метрология и измерительная техника в 2000 г. Аспирант кафедры "Автомобильная электроника" Харьковского национального автомобильно-дорожного университета.

Основные направления научной деятельности: магнитно-импульсная обработка листовых металлов.



Воробьев Валерий Валериевич – Защитил диплом инженера в Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете по специальности электрические системы и комплексы транспортных средств 2010 г. Аспирант кафедры "Автомобильная электроника" Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Основные направления научной деятельности: магнитно-импульсная обработка листовых металлов.



Чаплыгин Евгений Александрович – кандидат технических наук. Защитил диплом инженера, диссертацию кандидата технических наук в Национальном техническом университете "ХПИ" по специальности техника сильных электрических и магнитных полей, соответственно в 2003, 2009 гг. Доцент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета.

Основные направления научной деятельности: решение задач математической физики.

Поступила в редколлегия 26.10.2011

ISSN 2079-3944. Вісник НТУ "ХПИ". 2011. № 60

Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.

О.В. ГОЛИК, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

В.В. ХОРУЖИНА, студентка, НТУ "ХПИ", Харьков

Ю.П. ТОЛОШНЯ, студентка, НТУ "ХПИ", Харьков

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

У наданій статті розглянуті перспективи використання нових матеріалів у виробництві силових кабелів на напругу 20-35 кВ. Проаналізовані тенденції розвитку традиційної паперової імпрегнованої ізоляції, ізоляції зі зшитого поліетилену (XLPE), етиоенпропиленової гуми (EPR). Наведена порівняльна характеристика різних типів сучасної ізоляції, яка використовується при виробництві кабелів середньої напруги.

В статье рассмотрены перспективы применения новых материалов в производстве силовых кабелей на напряжение 20 -35 кВ. Проанализированы тенденции развития традиционной бумажной пропитанной изоляции, изоляции из сшитого полиэтилена (XLPE), этиленпропиленовой резины (EPR). Дана сравнительная характеристика различных видов современной изоляции, использующихся при производстве кабелей среднего напряжения.

Постановка проблемы. Для развивающейся экономики и промышленности Украины, которая характеризуется развитием энергоемких производств необходимо использование большого числа различных типов силовых кабелей, предназначенных для распределения и передачи электрической энергии. Одним из сегментов кабельно-проводниковой продукции являются кабели среднего напряжения 20-35 кВ с бумажной пропитанной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена. Эти изоляционные материалы обладают достаточно хорошими диэлектрическими характеристиками. Однако другие свойства, обусловленные их природой и химическим составом, значительно отличаются. Например, сшитый полиэтилен подвержен развитию водных триингов при эксплуатации во влажных условиях и под воздействием электрического поля. Таким образом, все применяемые типы изоляции обладают определенным набором, как достоинств, так и недостатков, которые должны быть учтены как при монтаже, так и при эксплуатации изделий. Также возникает необходимость использования материалов, обеспечивающих работоспособность промышленных объектов в условиях повышенных температур, влажности и т.д. В последние годы в результате климатических изменений погодные условия на

Украине стали более жесткими: резкие колебания температур, засухи, наводнения, жаркое лето и холодная зима. Данные факторы приводят к тому, что заказчики желают повышения надежности и расширения зон эксплуатации кабелей. Основными критериями являются применение кабелей с оболочками, устойчивыми к солнечной радиации, расширенный температурный диапазон, безопасное использование во взрывоопасных зонах.

Анализ последних исследований и публикаций. Конструкция кабелей с бумажной изоляцией (БПИ) обязательно включает в себя металлическую оболочку, которая не только механически защищает изоляцию, но и предотвращает радиальное проникновение влаги в кабель. При производстве кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (XLPE) для защиты от радиального проникновения влаги необходимо использовать специальный металлический слой из алюмополимерной ленты или применять алюминиевую или свинцовую оболочки. [2]. В Украине в настоящее время кабели с XLPE-изоляцией на напряжение 10-35 кВ в основном выпускаются в одножильном исполнении. Данная конструкция не допускает использование стальных защитных покрытий в кабеле, а, следовательно, прокладка таких кабелей возможна только в каналах или траншеях с установкой дополнительной защиты от повреждения кабеля. Еще одно преимущество серийно выпускаемых кабелей с БПИ состоит в том, что они изготавливаются с бронепокровом из стальных лент или проволок, защищающих кабель от повреждения при прокладке или эксплуатации [2]. В то же время кабели с БПИ имеют один существенный недостаток: при прокладке кабелей на вертикальных и крутонаклонных трассах с большой разницей уровней прокладки маслोकанифольный состав, пропитывающий бумажную изоляцию, имеет свойство стекать, при этом бумажная изоляция обедняется и имеет склонность к преждевременному старению. Для уменьшения данного эффекта применяются кабели с нестекающим пропиточным составом [1]. Кабели с полимерной изоляцией (XLPE) такого недостатка не имеют.

Одна из важнейших характеристик изоляционных материалов – это допустимая температура нагрева токопроводящих жил – максимальная температура, при которой изоляционный материал не теряет своих свойств в течение длительного времени. Поскольку XLPE – термореактивный материал, его длительно допустимая температура нагрева значительно выше, чем у других материалов, применяемых для изоляции силовых кабелей. Имея допустимую температуру 90°C (что на 20°C выше, чем у ПВХ- и БПИ-изоляции), кабели с XLPE изоляцией имеют со-

ответственно допустимые токовые нагрузки на 20% выше [3].

Цель и задачи исследования. Основные цели и задачи исследования – провести сравнительный анализ основных видов изоляции кабелей среднего напряжения, показать возможности решения проблем, возникающих при эксплуатации кабелей с помощью применения новых изоляционных материалов.

Основной материал исследования. Сравнительная характеристика пропитанной бумажной изоляции и сшитого полиэтилена приведена в табл. 1. Однако, несмотря на очевидные преимущества изоляции из сшитого полиэтилена, есть и моменты, требующие особого внимания. Допустимые фактические токовые нагрузки могут не соответствовать указанным в рекламных проспектах. Это связано с тем, что повышение температуры требует отвода выделившегося тепла, источником которого является токопроводящая жила, в окружающую среду.

Таблица 1 – Достоинства и недостатки изоляции силовых кабелей среднего напряжения

Тип изоляции кабеля	Достоинства	Недостатки
БПИ (1-35 кВ)	- многолетний положительный опыт эксплуатации; - наличие нормативной базы; - применение свинцовых оболочек, препятствующих радиальному проникновению влаги; - наличие бронепокровов; - высокая стойкость к комутационным перенапряжениям	- ограниченная прокладка на вертикальных и крутонаклонных трассах; - больший вес и диаметр кабеля (по сравнению с кабелями с XLPE); - производство свинцовых оболочек является вредным и экологически небезопасным.
XLPE (1-35 кВ)	- более высокие токовые нагрузки*; -возможность прокладки на трассах с неограниченной разностью уровней; - простота и удобство при прокладке и монтаже	- необходимость в дополнительной защите от внешних повреждений; - отсутствие нормативной базы и недостаток информации об опыте эксплуатации КЛ с использованием силовых кабелей данного типа; - появление водных триингов в изоляции под воздействием влаги.

* - температура жилы при работе в номинальном режиме составляет 90⁰С (для кабелей с БПИ – 70⁰С)

Также существуют определенные сложности с прокладкой (прокладка по три кабеля) и ограничения при эксплуатации во влажной сре-

де. Можно предложить пути решения данных вопросов: 1) применение усовершенствованных материалов в кабелях с БПИ и XLPE изоляцией; 2) освоение новых перспективных технологий производства кабелей с изоляцией из этиленпропиленовой резины (EPR изоляцией).

В настоящее время существуют две концепции снижения негативного влияния водных триингов на свойства изоляции: 1) в полиэтилен вводятся специальные химические добавки, в итоге получается триингостойкий сшитый полиэтилен – ТСПЭ; 2) создаются макромолекулы, в состав которых, помимо этилена, входит более 5% других химических соединений, в итоге получается сополимерный сшитый полиэтилен – ССПЭ (механическая смесь полиэтилена низкой плотности, сополимера - этилена и этилакрилата или бутилакрилата и антиоксиданта, снижающего скорость окислительных процессов)[4].

Впервые "триингостойкий сшитый полиэтилен" – материал со специальными добавками был представлен в начале 80-х годов в США [6]. Результаты испытания на старение (кабели с защитной оболочкой испытывались под воздействием воды и в температурных условиях, сравнимых с температурами эксплуатации) приведены на рис.1.



Рис. 1. Результаты испытаний на старение кабелей среднего напряжения.

Для улучшения характеристик бумажной пропитанной изоляции разработаны новые бумаги и рецептуры пропитывающих составов. Для исключения поперечных и продольных надрывов, карманов и трещин бумажных лент предложено использовать в изоляции кабеля бумагу – основу кабельную микрокрепированную [5]. Преимущества в свойствах, которыми обладает крепированная бумага, объясняется приданием волокнам повышенных упругопластичных свойств и высокой гибкости. Также разработаны новые загустители, которые применяются в производстве нестекающих пропиточных составов, что позволяет избежать стекания при вертикальных прокладках не ухудшая изоляционные характеристики материала.

Одним из перспективных направлений развития кабельной промышленности является производство силовых кабелей с изоляцией из этиленпропиленовой резины (EPR). Этиленпропиленовая резина относится к эластомерам – сополимерам этилена с пропиленом, обладающим высокой прочностью и эластичностью, очень устойчивыми к тепловому старению, имеют высокие диэлектрические свойства. Следовательно, EPR изоляция обладает некоторыми преимуществами:

- повышенная эластичность, что позволяет эксплуатировать кабель в условиях повышенных вибронагрузок;

- отличные термомеханические характеристики (изгиб кабеля вызывает незначительные механические напряжения слоев изоляции, что не вызывает неравномерного распределения напряженности в толщине изоляции;

- стойкость изоляции к абсорбции влаги и в результате стойкость к образованию водных триингов;

- длительно допустимая рабочая температура этиленпропиленовой резины достигает 105°C ;

- материал сохраняет отличные эксплуатационные характеристики при отрицательных температурах – 60°C ;

- кабели с изоляцией из этиленпропиленовой резины допускаются к прокладке во взрывоопасных зонах всех классов.

Существует зарубежный опыт эксплуатации данных кабелей в климатических зонах с повышенными среднегодовыми температурами, высоким уровнем грунтовых вод, засухами и наводнениями. Один из вариантов конструкции кабеля приведен на рис.2. где основными элементами являются:



Рис. 2. Конструкция кабеля с EPR изоляцией.

1 – медная (алюминиевая) круглая уплотненная токопроводящая жила; 2 – экструдированный экран по ТПЖ из полупроводящего материала; 3 – изоляция из этиленпропиленовой резины; 4 – экструдированный экран по изоляции; 5 – экран из полупроводящей ленты, намотанный по спирали; 6 – экран из медных проволок, поверх которых наложена медная лента; 7 – внутреннее заполнение из синтетической резиновой композиции; 8 – внутренняя оболочка из ПВХ пластиката; 9 – броня из оцинкованных стальных проволок и оцинкованной ленты, наложенной с зазором; 10 – наружная оболочка из ПВХ пластиката.

Выводы. Основные выводы можно сделать следующие: 1) Сравнительный анализ основных типов изоляции кабелей среднего напря-

жения показал наличие недостатков, как у традиционной бумажной пропитанной изоляции, так и у более современной изоляции из сшитого полиэтилена. 2) Решением некоторых проблем изоляции может быть применение новых и усовершенствованных материалов – мелкокрепированных бумаг, новых рецептур пропиточных составов, триингостойкого сшитого полиэтилена, что позволит повысить качество и технологичность силовых кабелей, а также улучшить их эксплуатационные характеристики. 3) Наряду с вышеперечисленными мерами одним из перспективных направлений является освоение новой технологии – изготовления кабелей среднего напряжения с изоляцией из этиленпропиленовой резины, по некоторым характеристикам превосходящей даже изоляцию из сшитого полиэтилена. Опыт подобного производства уже имеется на российских предприятиях и является достаточно успешным.

Список литературы: 1. *Ларина Э.Т.* Силовые кабели и кабельные линии: Уч. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с. 2. *Савченко В.Г.* Силовые кабели: тенденции и традиции / В.Г. Савченко // Энергослужба предприятия. – 2006. – №3(21). – С. 10-12. 3. *Золоторев В.М.* Новые отечественные разработки в области силовых кабелей / В.М. Золоторев, А.Л. Обозный // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2006. – Вип. 34. – С.129-132. 4. *Бустром Дж.* Соплимерные композиции сшитого полиэтилена (Super Soro) для высоконадежных силовых кабелей среднего напряжения / Дж. Бустром, А. Кампус, Р. Хемптон, П.Хейк-кала, К. Ягер, А. Спедберг, Д. Валд // Кабели и провода. – 2005. – № 5. – С. 7-12. 5. *Курашов Д.А.* Новые материалы для силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией./ Д.А. Курашов, В.Г. Савченко, В.К. Барсуков, Е.В.Барсуков, Н.П. Кадочников, Е.В. Макарова // Наука и техника – 2008. – №5(312). – С. 42-45. 6. *Мендельсон А.* Мировой опыт применения изоляции из триингостойкого полиэтилена. Для кабелей среднего напряжения с длительным сроком эксплуатации / А. Мендельсон, М.У. Аартс // Наука и техника. – 2005. – №5(294). – С. 23-29.

*Поступила в редколлегию 17.10.2011
Рецензент д.т.н., проф. Гурин А.Г.*

Л.А. ШЕБЕНЮК, канд. техн. наук., проф., НТУ "ХПІ", Харків

Т.Ю. АНТОНЕЦЬ, аспірант, НТУ "ХПІ", Харків

І.С. КОЧІН, студент, НТУ "ХПІ", Харків

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОЇ СПРОМОЖНОСТІ СИЛОВОГО КАБЕЛЮ, ПРОКЛАДЕНОГО В ПРИМІЩЕННІ

Експериментально оцінено коефіцієнти перевантажувальної спроможності та теплопередачі для кабелю АВВБ 3х25-1, прокладеного в приміщенні.

Експериментально оцены коэффициенты перегрузочной способности и теплопередачи для кабеля АВВБ 3х25-1, проложенного в помещении.

Постановка проблеми. Кількісними показниками навантаження в системах електропостачання є потужність та струм, які в трьохфазній системі пов'язані співвідношенням $P = I \cdot U - \sqrt{3}$, де U — лінійна напруга. Навантаження силових кабелів обмежується максимальною допустимою температурою ізоляції. При виборі та проектуванні кабелів в якості **основних показників пропускну́ї спроможності** використовують: струм в стаціонарному, найбільш навантаженому робочому режимі (номінальний струм) $I_{\text{доп}}$; струм в режимі нормативно допустимого перевантаження.

Нестаціонарні режими навантаження, за яких параметри процесів тепломасопереносу залежать від часу і є нелінійними, в практиці дуже поширені і їх задають, наприклад, у вигляді добових графіків навантаження. Очевидно, що таких можливих нестаціонарних режимів безліч. В практиці застосовують два основні підходи до характеристики можливих перевантажень кабелю. Перший - визначення кривих перевантажувальної спроможності у вигляді залежностей кратності струму перевантаження $I_{\text{п}}$ до гранично допустимого струму $I_{\text{доп}}$ в стаціонарному режимі роботи кабелю від часу перевантаження. За такими залежностями розроблюють нормативи для конкретних кабельних ліній, оскільки відповідні кратності залежать від умов прокладання. Наприклад, півгодинний (або інший, табл. 1) струм не повинен перевищувати струм, кратний $I_{\text{доп}}$, причому коефіцієнт кратності може бути визначений розрахунком для нестаціонарного теплового режиму. Основним показником при змінному графікові навантаження з півгодинним мак-

симумом навантаження є півгодинний максимально допустимий струм, що дорівнює $1,5 I_{\text{доп}}$, де $I_{\text{доп}}$ — розрахунковий необмежено тривалий допустимий струм в стаціонарному режимі.

Таблиця 1 – Приклади допустимих аварійних перевантажень кабельних ліній

Коефіцієнт завантаження в нормально- му режимі	Вид прокла- дення	Коефіцієнт допустимого перевантаження при тривалості максимуму, годин		
		1	2	3
0,6	В землі	1,50	1,35	1,25
	В повітрі	1,35	1,25	1,25
	В трубах	1,30	1,20	1,15
	(в землі)			
0,8	В землі	1,35	1,25	1,20
	В повітрі	1,30	1,25	1,25
	В трубах	1,20	1,15	1,10
	(в землі)			

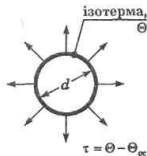
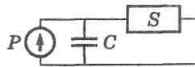


Рис. 1. Схема моделі нагрівання та охолодження.



Для наближених розрахунків нестационарного теплового режиму використовують модель **нагрівання** та охолодження однорідного проводу (рис. 1), що базується на рівнянні теплового балансу, згідно з яким тепло, що виділяється в проводі при проходженні по ньому струму, йде на нагрівання самого проводу та відводиться в навколишнє середовище:

$$P dt = C d\tau + \tau dt / S, \quad (1)$$

де P — потужність тепловиділення за умови, що температура провідника не повинна перевищувати гранично допустиму, визначену для стаціонарного режиму навантаження, дорівнює

$$P = P_{\text{доп}} = I_{\text{доп}}^2 R_g(\Theta_1);$$

$R_g(\Theta_1)$ — електричний опір жили за гранично допустимої температури Θ_1 , $I_{\text{доп}}$ — необмежене довготривалий струм в жилі, тобто $P = P_{\text{доп}} = \tau_{\text{max}}/S$ при перевищенні температури над температурою оточуючого середовища $\tau_{\text{max}} = \Theta_1 - \Theta_2$ в стаціонарному тепловому режимі; C — теплоємність кабелю; S — тепловий опір оточуючого середовища, для повітря $S = 1/\pi d \alpha$; α — коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/^\circ\text{C}\cdot\text{м}^2$; d — діаметр кабелю; τ — поточний перегрів відносно температури оточуючого сере-

довища; t – час дії струму перевантаження.

За МЕК 287-2-1 та МЕК 287-2-2 рекомендоване значення коефіцієнт теплопередачі, зумовленого конвективним теплообміном в оточуючому повітрі, $\alpha = 10 \text{ Вт/}^\circ\text{С м}^2$, яке за можливості має бути визначене експериментально для даних умов експлуатації. Таке визначення дозволяє надійніше оцінити пропускну спроможність кабелю в заданих умовах.

Мета. Експериментально визначити значення коефіцієнту теплопередачі α , зумовленого конвективним теплообміном, для кабелю АВВБ 3х25-1, прокладеного в приміщенні для визначення його перевантажувальної спроможності.

Аналіз літератури. Для визначення коефіцієнту теплопередачі α , зумовленого конвективним теплообміном, ІЕС 287-2-1 та ІЕС 287-2-2 рекомендує враховувати конкретні умови прокладання, зокрема: висихання ґрунту довкола кабелю, прокладеного в землі, і дію теплового випромінювання на кабель, прокладений у повітрі [1]. Однак в [1] не визначено метод виконання цих рекомендацій.

Одержані результати. Для визначення α , через три жили кабелю

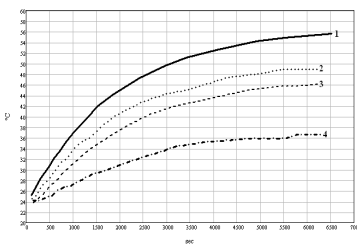


Рис. 2 - Криві нагрівання елементів кабелю АВВБ 3х25-1:
1 – жила; 2 – екран; 3 – оболонка;
4 – поверхня.

АВВБ 3х25-1, з'єднані разом, пропустили струм 200 А промислової частоти. Вимірювання температури елементів кабелю проводилися за допомогою чотирьох термопар мідь-константан, підключених до мілівольтметра. Термопари розміщені в жили кабелю, в напівпровідному екрані, в оболонці та на поверхні кабелю. Одержані результати експерименту представлені на рис. 2.

Аналіз одержаних результатів.

Рішення диференційного рівняння теплового балансу (1) відносно поточного перегріву при початкових умовах дають наближені співвідношення, які дозволяють визначити перевантажувальну спроможність практично у будь-яких нестационарних режимах. При цьому основна вимога, - температура провідника не повинна перевищувати гранично допустиму, визначену для стаціонарного режиму навантаження.

Для режиму включення (за температури довкілля) $t = 0$; $\tau = 0$:

$$\tau = \tau_{\max} \cdot (1 - e^{-t/\beta}), \quad (2)$$

де β – постійна нагрівання, яка дорівнює добутку теплоємності прово-

ду на тепловий опір оточуючого середовища $\beta = C \cdot S$.

Ця модель є достатньо точною для теплових розрахунків кабелів у нестационарних режимах, якщо товщина ізоляції невелика відносно розмірів жили. При цьому режим навантаження є допустимим, якщо поточний перегрів не перевищує максимально допустимий. Із цієї ж умови знаходять струм та час допустимого перевантаження. Струм та час допустимого перевантаження при первинному включенні пов'язані співвідношенням, що випливає з (2):

$$I_n = I_{\text{доп}} / [1 - \exp(-t_n / \beta)]^{0.5}, \quad (3)$$

Експоненційна модель (2) нагрівання кабелю є двох параметричною, її параметри: τ_{max} – максимальне перевищення температури жил кабелю над температурою оточуючого середовища в стаціонарному тепловому режимі; β – постійна нагрівання кабелю.

Для визначення параметрів використано залежність $\tau^* = f(t^*)$, показану на рис. 3.

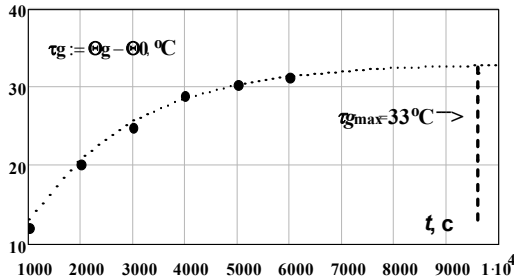


Рис. 3. Графік залежності $tg = f(t)$ перевищення температури жили Θ_g^* над температурою Θ_0^* оточуючого повітря від часу t^* протікання струму за експериментальними даними (точки на графіку: $t = t^*$; $tg = \tau^*$; $\tau^* = \Theta_g^* - \Theta_0^*$).

За одержаними експериментальними даними і графічно оцінити значення τ_{max}^* (тут і далі "*" означає експериментально визначену величину). Другий параметр експоненційної моделі (2) нагрівання кабелю, а саме – постійна нагрівання β визначена як параметр лінійної функції, одержаної логарифмуванням (2):

$$\ln(1 - \tau / \tau_{\text{max}}) = (-1 / \beta) \cdot t = b \cdot t. \quad (4)$$

Кутовий коефіцієнт b лінійної функції (4) обернено пропорційний до постійної нагрівання кабелю β .

Для визначення постійної нагрівання кабелю за експериментальними даними побудовано графік лінійної функції (4), за результатами вимірювання значень часу нагрівання t^* по осі абсцис, а по осі ординат

відповідні значення $\ln(1 - \tau^* / \tau_{\max}^*)$ (5).

Оскільки експериментальні точки близькі до прямої, визначено постійну нагрівання β як кутовий коефіцієнт цієї прямої (рис.4).

$$\ln(1 - \tau^* / \tau_{\max}^*) = f(t^*). \quad (5)$$

Постійна нагрівання також може бути визначена за експериментальними даними аналітично, методом найменших квадратів:

$$\beta = -\Sigma(t_i - t_{cp})^2 / \Sigma(t_i - t_{cp}) \cdot \{ \ln(1 - \tau_i^* / \tau_{\max}^*) - [\ln(1 - \tau_i^* / \tau_{\max}^*)]_{cp} \}, \quad i \in [1; n], \quad (6)$$

де n – кількість вимірювань; i – порядковий номер вимірювання.

Приклад застосування моделі нагрівання та охолодження проводу в повітрі за величиною експериментально визначеної постійної нагрівання β для оцінювання допустимого годинного перевантаження силового кабелю АВВБ 3х25-1, прокладеного в повітрі, базується на використанні моделі (3).

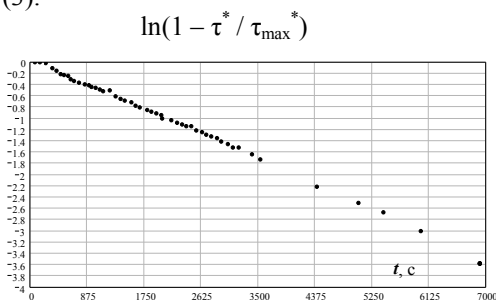


Рис.4. Графік залежності (6) для експериментального визначення постійної нагрівання (для цього графіку: $\beta^* \sim 7000 / [-(3,6)] = 1944 \text{ c}$).

За (3) визначається відношення $I_{\pi} / I_{\text{доп}}$ для часу дії струму перевантаження $t_{\pi} = 3600 \text{ c}$:

$$I_{\pi} / I_{\text{доп}} = [1 - \exp(-t_{\pi} / \beta)]^{-0,5}, \quad (7)$$

Кратність допустимого перевантаження на протязі 60 хвилин після включення кабелю:

$$I_{\pi} / I_{\text{доп}} = [1 - \exp(-3600 / 1944)]^{-0,5} = 1,186.$$

Експериментально оцінена кратність допустимого годинного перевантаження силового кабелю АВВБ 3х25-1, прокладеного в повітрі, виявилася меншою за нормативну для силових кабелів низької напруги (табл. 1). Припущення про вплив гірших конкретних умов охолодження експериментально не підтвердилось. Коефіцієнт теплопередачі α визначено на основі експериментальної оцінки потужності теплового

потоків $P_{ж}^* = (I_{ж}^*)^2 \cdot R_{ж}$, та різниці температур між поверхнею кабелю і оточуючим середовищем:

$$\theta_{пов}^* - \theta_{ос}^* = P_{ж} \cdot S_{ос}, \text{ звідки } S_{ос}^* \approx 0,754 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2.$$

Відповідна оцінка коефіцієнт теплопередачі α за температури оточуючого середовища 24°C :

$S = 1/\pi d \alpha$; де d – діаметр кабелю становить $15,93 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$, що суттєво перевищує нормативний показник, наведений в [2], який дорівнює $10 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$.

Висновок. Експериментально оцінено кратність допустимого півгодинного перевантаження силового кабелю АВВБ 3х25-1, прокладеного в повітрі, для якого відповідний коефіцієнт перевантаження виявився меншим за нормативний (табл.1), що свідчить про актуальність саме експериментального визначення перевантажувальної спроможності в конкретних умовах експлуатації.

Експериментально оцінено коефіцієнт теплопередачі, зумовлений конвекційним теплообміном, для кабелю АВВБ 3х25-1, прокладеного в приміщенні, який дорівнює $15,93 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}$. Отримане значення дещо перевищує наведене в [2], яке дорівнює $10 \text{ Вт/}^\circ\text{С}\cdot\text{м}^2$ і стосується орієнтовно рівня для всіх силових кабелів. Значення для кабелю марки АВВБ 3х25-1 пов'язане з його невеликим діаметром, який складає 25 мм. Таким чином за порівняно кращих умов конвекційного теплообміну вирішальним при визначенні перевантажувальної спроможності є визначення постійної нагрівання кабелю конкретної конструкції. Використання універсальних таблиць перевантажувальної спроможності може спричинити появу небажаного перегрівання кабелю.

Список літератури: 1. IEC 287-2-1 та IEC 281-2-2. Electric cables. Calculation of the current rating. Thermal resistans. – Geneva: IEC CO 3.1995.05. 2. В.П. Карпушенко, Л.А. Щебенюк, Ю.О. Антонець, О.А. Науменко. Силові кабелі низької та середньої напруги // Конструювання, технологія, якість. – Харків: "Регіон-Інформ", 2000.

*Поступила в редколлегию 12.10.2011
Рецензент д.т.н., проф. Гурин А.Г.*

В.Б. ЮФЕРОВ, д-р техн. наук, нач. отдела ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

А.М. ЕГОРОВ, д-р физ.-мат. наук, директор ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

С.В. ШАРЫЙ, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

О.С. ДРУЙ, руководитель группы, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

В.О. ИЛЬИЧЕВА, вед. инженер-исследователь, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

М.О. ШВЕЦ, инженер-исследователь, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

А.С. СВИЧКАРЬ, аспирант, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

Т.И. ТКАЧЕВА, аспирант, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМОЙ В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Розглянуті результати досліджень циліндричної плазми, що обертається в скрещених електричному і магнітному полях. Розрахунки і експерименти показали, що при певних співвідношеннях електричного і магнітного полів за рахунок енергії системи радіального електричного поля можливий нагрів і сепарація іонів різних сортів.

Рассмотрены результаты исследований цилиндрической плазмы, вращающейся в скрещенных электрическом и магнитном полях. Расчеты и эксперименты показали, что при определенных соотношениях электрического и магнитного полей за счет энергии системы радиального электрического поля возможен нагрев и сепарация ионов разных сортов.

Применение газовых центрифуг для разделения изотопов ограничено химическими элементами, имеющими газообразные соединения с достаточно высокой упругостью паров в нормальных условиях [1]. В то же время универсальный электромагнитный метод, пригодный для всех элементов, имеет малую производительность. Поэтому актуально развитие альтернативных методов разделения изотопов и элементов, в частности, плазменных [1].

С середины 50-х годов прошлого века внимание исследователей привлекли системы с вращающейся плазмой в скрещенных $E \perp H$ полях применительно к нескольким приложениям: возможного термоядерного реактора (ТЯР), импульсных накопителей энергии, сепараторов заряженных частиц, плазмохимического реактора (ПХР).

Сепараторы заряженных частиц с вращающейся плазмой, получившие название плазменных центрифуг, представлялись перспективным объектом даже в сравнении с механическими (газовыми), показавшими к тому времени свою высокую эффективность. Перспективность связана с возможностью разделения изотопов любых элементов, не имеющих газообразных соединений, возможности достижения более высоких скоростей вращения ионизованного газа, чем в механических центрифугах. Привлекала также простота конструкции и отсутствие механических движущихся частей [2]. Вращение ионизованной смеси осуществлялось за счет взаимодействия радиального электрического тока I_r и осевого магнитного поля B_z . При этом возможны варианты: электрическая сила направлена против центробежной и сонаправлена. Плазма может быть полностью и частично ионизована, и, если в первом варианте имеется исключительно плазменная центрифуга, то во втором – комбинация газовой центрифуги с плазменной.

Расчеты, выполненные в одночастичном приближении для обоих случаев направления электрического поля, позволили сделать следующие выводы. Заряженные частицы, двигающиеся во вращающейся плазме, подвергаются действию трех сил: центробежной – $F_c = Mr\omega^2$, электрической $F_E = eE_r$ и магнитной $F_B = er\omega B_z$, где M – масса частицы, r – расстояние частицы до оси вращения, ω – круговая частота вращения частицы, E_r – напряженность электрического поля, B_z – индукция магнитного поля, e – заряд электрона.

В плазменной центрифуге принято, что электрическое поле направлено радиально внутрь (отрицательный потенциал на оси), то есть при данных условиях, электрическая сила F_E направлена против центробежной силы F_c , действующей на частицу, и, соответственно, условие равновесия в радиальном направлении может быть выражено:

$$F_c - F_E - F_B = 0, \quad (1)$$

или

$$Mr\omega^2 - eE_r - er\omega B_z = 0. \quad (2)$$

Очевидно, что подбором параметров возможно задать траектории частиц. Уравнение имеет два действительных решения:

$$\omega = \frac{\Omega}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{4E_r}{rB_z\Omega}} \right), \text{ где } \omega_{ci} = \Omega = eB_z / M. \text{ Частицы с большей мас-}$$

сой находятся на траекториях с большим радиусом, легкие – ближе к оси вращения, то есть происходит пространственное разделение по массам.

Когда электрическое поле направлено наружу, положительный потенциал в центре, электрическая сила дополняет центробежную:

$$F_c + F_E - F_B = 0, \quad (3)$$

или

$$Mr\omega^2 + eE_r - er\omega B_z = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) имеет вид:

$$\omega = \frac{\Omega}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4E_r}{rB_z\Omega}} \right). \quad (5)$$

Если дискриминант равен нулю, то угловая частота частицы в два раза меньше значения циклотронной частоты, $2\omega_E = \omega_{ci}$. Если же $4E_r / rB_z\Omega > 1$, тогда ω имеет мнимые корни, и равенство сил не достигается. Таким образом, возможно появление двух сортов частиц, характеризующихся критической величиной массы:

$$M_c = ea^2 B_z^2 / 8U_c, \quad (6)$$

где a – радиус камеры, U_c – значение положительного напряжения на продольной оси, на стенке – нулевой потенциал [3]. При этом легкие частицы с массой, меньшей чем M_c , локализованы на орбитах, а тяжелые, с большей чем M_c массой, имеют нелокализованные орбиты, и могут выйти на боковую стенку. Сепарация происходит следующим образом: локализованные частицы с меньшей массой движутся вдоль магнитного поля, нелокализованные – поперек. Таким образом, сепарируемые частицы могут быть собраны на различных поверхностях, в частности, в виде пленочных осадков, если речь идет о веществах, не находящихся в газовом состоянии [3].

Многочисленные эксперименты, проведенные при различных условиях, показали следующее. Центробежный эффект разделения не является единственным механизмом, который может наблюдаться в плазменной центрифуге [2]. Наличие источников тепловыделения в плазме, связанных с омическими потерями при протекании электрических токов и вязкой диссипацией (наличием нейтрального газа), при-

водит к возникновению в разделяемой смеси градиентов температуры, плотности, давления, которые, в свою очередь, вызывают различные процессы переноса частиц, например, термодиффузию. Кроме того, в плазменной центрифуге радиальный ионный поток в условиях замagnetности электронной составляющей, вызывает разделительные эффекты, связанные с селективностью передачи направленного импульса от ионов к нейтралам ("ионный ветер"). Обычно действие "ионного ветра" приводит к обогащению тяжелым изотопом прикатодной области. Для смесей легких газов: неона, гелия, водорода – были получены удовлетворительные результаты (коэффициент разделения: 5-10), для тяжелых – ксенона – коэффициент разделения составлял $\sim 1,1$ [2].

Для полностью ионизованной плазмы ситуация оказалась другой. На рис. 1,а представлен схематический вид плазменной центрифуги с высокой ионизацией паров металла [2], где 1 – масс-спектрометр; 2 – вакуумная камера; 3 – катушки магнитного поля; 4 – излучение лазера; 5 – катод. На рис. 1,б приведена зависимость потенциала плазмы и толщины напыленной металлической пленки от радиальной координаты вблизи оси магнитного поля.

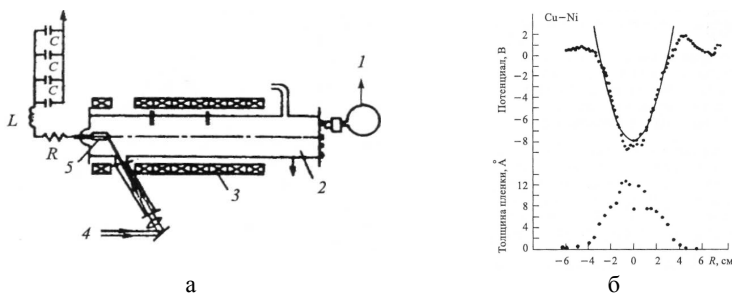


Рис. 1. Схема плазменной центрифуги (9) и ее характеристики.

Плазма создавалась с помощью лазерного импульса, приходящего на Cu-Ni катод, после чего происходил разряд конденсаторной батареи, создающей радиальное электрическое поле. На рис. 1,б представлен профиль толщины пленки осадка Cu-Ni, полученный вблизи оси камеры и магнитного поля, то есть разделяемый продукт локализовался и распространялся вдоль оси магнитного поля.

Таким образом, комбинированные системы с частично ионизованной газовой плазмой дали удовлетворительные результаты, для объяснения которых требовалось привлечение дополнительных сил,

кроме центробежной. Плазменные центрифуги с полностью ионизованной плазмой требовали продолжения исследований.

В этом плане представляет интерес цикл работ Рожкова-Степанова [4-9], в которых исследовались коллективные процессы во вращающейся в скрещенных $E \perp H$ полях плазме. Эти работы подтвердили теоретические выводы Михайловского [10], объяснившего результаты работы Иоффе [11] на установке с вращающейся в скрещенных $E \perp H$ полях плазме, использовавшейся для нагрева плазмы. Схематический вид установки с Пеннинговским разрядом представлен на рис. 2, где цифрами обозначено: 1 – вакуумная камера; 2 – катушки магнитного поля; 3, 6 – отражательные электроды-катоды; 4 – накаливаемый катод для зажигания плазмы в высоком вакууме; 5 – анод; 7 – магнитный анализатор. В работах [4-9] показано, что поведение плазмы, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях, в значительной мере определяется коллективными взаимодействиями, приводящими к возбуждению в плазме различного типа неустойчивостей.

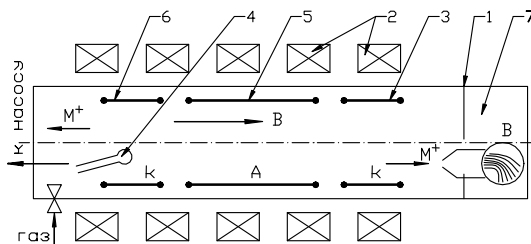


Рис. 2. Схематический установки с Пеннинговским разрядом.

При напряженности магнитного поля, меньшей критической, $H_c = \sqrt{2Mc^2 E_r / er}$ [6], в плазме развивается пучково-центробежная (или дрейфовая) неустойчивость, на частотах, значительно больших ионной циклотронной частоты. Экспериментальные результаты исследования этой неустойчивости согласуются с теоретическими данными. Когда частота вращения плазмы оказывается кратной гирочастоте ионов ($H \geq H_c$), в разряде развивается резонансная циклотронная неустойчивость, приводящая к непрерывной генерации ионно-циклотронных колебаний большой амплитуды, надтепловому излучению из разряда и эффективному нагреву ионов (рис. 3 и 4). На рис. 3 приведены энергетические спектры ионов при резонансной ионно-

циклотронной неустойчивости для: а) $H = 2,5H_c$; б) $H = 1,5H_c$; в) $H = H_c$. На рис. 4 представлено распределение напряженности магнитного поля и интенсивности ВЧ-колебаний вдоль оси системы. Резонансная ионно-циклотронная неустойчивость возникает при скорости относительного движения компонент плазмы, значительно меньшей тепловой скорости ионов.

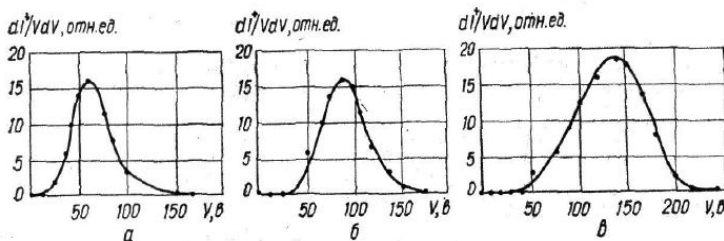


Рис. 3. Энергетические спектры ионов.

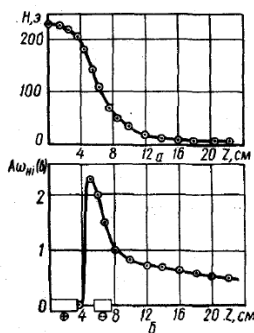


Рис. 4. Характеристики распределения напряженности магнитного поля и интенсивности ВЧ-колебаний вдоль оси системы.

В дальнейших работах [7], помимо исследований генерации излучения при различных типах неустойчивости, проводились исследования пространственных распределений и вывода ионных компонент плазмы. На рис. 5 представлено радиальное распределение интенсивностей оптического излучения молекулярных и атомарных ионов азота (а), потоков ионов, уходящих из плазмы вдоль магнитного поля B_z (б), амплитуды ионных циклотронных колебаний (в). На рис. 6 приведены энергетические спектры ионов с разной массой, покидающих разряд вдоль магнитного поля.

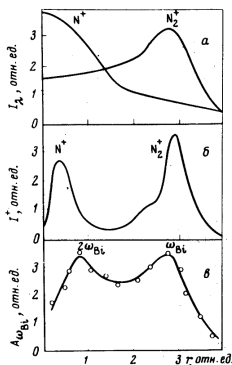


Рис. 5. Радиальное распределение интенсивностей оптического излучения молекулярных и атомарных ионов азота

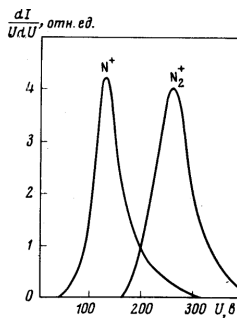


Рис. 6. Энергетические спектры ионов с разной массой.

Показано, что на резонансных частотах в условиях неустойчивости можно разделять различные компоненты плазмы. Резонансная ионно-циклотронная неустойчивость во вращающейся плазме возникает при $2\omega_E \approx \omega_{ci}$, где $\omega_{ci} = eB_z / M$ – циклотронная частота ионов с массой M и зарядом e ; $\omega_E \sim cE_r / rB_z$ – частота вращения ионов в магнитном поле B_z и электрическом E_r , r – расстояние до оси разряда [8]. Распределение потоков ионов и интенсивности их оптического излучения по радиусу аналогичны распределению по радиусу амплитуды ионно-циклотронных колебаний. Зависимости потоков ионов различных масс и энергий от параметров разряда (E_r , B_z , n_e , P) также оказываются аналогичными зависимости амплитуды циклотронных колебаний от этих параметров. Энергетические спектры ионов с различной массой, покидающие разряд вдоль магнитного поля, лежат в интервале 100-300 эВ и являются достаточно монохроматичными, что позволяет осуществить разделение ионов различных масс и по энергиям. В условиях, когда во вращающейся плазме ионно-циклотронная неустойчивость не развивается, например, в сильном поле E_r или слабом магнитном поле B_z , когда возбуждаются колебания с частотой $\omega \gg \omega_{ci}$, сепарации ионов по массам и энергиям не наблюдается. Таким образом, во вращающейся плазме в стационарном режиме в условиях развития ионно-циклотронной неустойчивости, источником развития которой является источник постоянного тока,

возникает пространственное и энергетическое разделение различных ионных компонентов. При этом соотношения электрических и магнитных полей выбирают из условия: $E/B^2 = 0,5er/M$ [8].

В работах [3,12,13] было предложено использовать вращающуюся в скрещенных $E \times B$ полях плазму для регенерации отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Приведенные выше решения уравнения (5) для положительного потенциала на оси системы получены в работе [3]. Схематический вид устройства, получивший название плазменный фильтр "Архимед", представлен на рис. 7. Предполагалось, что плазменный фильтр "Архимед" должен разделять ионы плазмы ОЯТ на легкие – ЯЗ (ядерная зола) и тяжелые – ЯТ (ядерное топливо) – массовые группы.

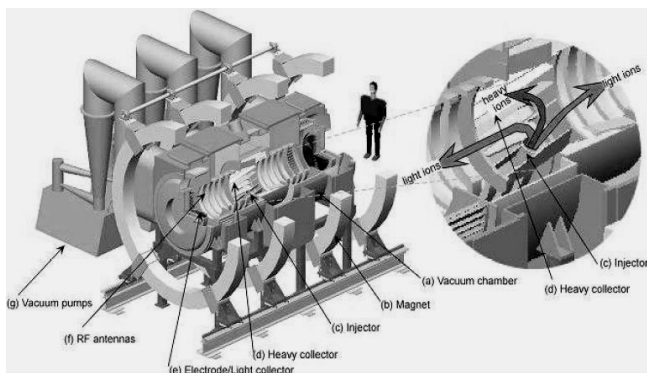


Рис. 7. Схема плазменного фильтра "Архимед".

Процесс базируется на вращении цилиндрической плазмы в скрещенных $E \times B$ полях. При достижении определенной критической скорости вращения $\omega_E \geq \omega_{ci}/2$ тяжелые ионы не удерживаются осевым магнитным полем и движутся в направлении боковой стенки. Так как скорость критического вращения зависит от магнитного поля, то плазменные параметры и параметры установки могут быть определены таким образом, чтобы отделить тяжелые радионуклиды от легких масс.

Демонстрационная установка с ВЧ-мощностью в 4 МВт способна создавать плазменный столб радиусом 0,4 м и длиной 3,9 м в магнитном поле 1,5 кЭ. ВЧ-антенны используются для создания и нагрева плазмы. Для вращения плазмы установлены два комплекта концентрических электродов на каждом из торцов устройства с возможностью подачи до 700 В на каждый. Расчетная производительность установки составляет около 0,7 т/день оксидной смеси. Получена аргоновая

плазма плотностью $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и определена ее скорость вращения, с точностью 2, совпадающая с расчетом.

Таким образом, проанализировав рассмотренные работы можно сделать следующие выводы. В плазменной центрифуге с высокой ионизацией паров металла [2] (рис. 1,а,б) должна существовать некая дополнительная сила, которая приводит к тому, что во вращающейся в скрещенных полях плазме наблюдается движение ионов в продольном направлении. В отличие от ожидаемых результатов – напыление металлической пленки на периферии подложки – экспериментально обнаружен рост пленки на оси.

В работах Рожкова-Степанова [4-9] исследуются коллективные явления во вращающейся плазме, которые могут являться той дополнительной силой, и также наблюдается выход ионов в осевом направлении. Однако в этой системе на движение ионов вдоль магнитного поля накладывается еще движение ионов за счет продольной составляющей напряженности электрического поля E_z , а также за счет резко падающего магнитного поля. В таких условиях сложно анализировать поведение заряженных частиц во вращающейся плазме, вызванное только коллективными явлениями. Отметим еще одну особенность: в разряде в условиях развития ионно-циклотронной неустойчивости ионы имеют широкий энергетический спектр (рис. 3). Это означает, что ионы, имеющие энергию более $\sim 100 \text{ эВ}$ (очевидно, это те ионы, которые находились в фазе с вращающейся плазмой), приобретают поперечную энергию, достаточную для выхода на стенку вакуумной камеры, а для менее энергетичных ионов (тех, которые недоускорились, находясь в противофазе) этой энергии будет не достаточно для выхода на стенку за один циклотронный оборот. В то же время, двигаясь в падающем магнитном поле (рис. 4), они перекачивают поперечную энергию в продольную с одной стороны, выходят из резонансного магнитного поля, попадают в область с меньшей амплитудой волны нагрева и остаются в разряде. В этом случае уменьшается сепарационный эффект за счет потери этих ионов.

Под термином "стационарная ионно-циклотронная неустойчивость", введенным авторами [4-9], следует понимать генерацию при определенных условиях ВЧ колебаний на частоте, близкой к ионной циклотронной частоте, вызывающую нагрев резонансных ионов. Термин "стационарная ионно-циклотронная неустойчивость" иногда вызывает непонимание. Однако условия возникновения НЧ-колебаний на ионно-циклотронных частотах во вращающейся плазме по аналогии с процессами в СВЧ магнетронах можно интерпретировать как процессы генера-

ции колебаний на частотах, близких к ионно-циклотронным в ионном магнетроне. Поэтому первое название более удобно по сравнению с последующим с точки зрения краткости изложения материала.

В плазменном фильтре масс "Архимед" не были проведены эксперименты по разделению элементов, поэтому говорить однозначно о заявленных механизмах разделения и полученных результатах не имеет смысла, поскольку, как было отмечено выше, практически в одинаковых условиях эксперимента (рис. 1,б) указывалось, что во вращающейся плазме происходят коллективные явления (может существовать дополнительная сила), которые, изменяя характер движения частиц, существенно влияют на процессы разделения.

В работах [14-16] с учетом анализа рассмотренных выше работ проведены исследования возможности выделения тяжелых фракций вращающейся цилиндрической многокомпонентной плазмы в скрещенных $E \perp H$ полях с положительным потенциалом на оси. Схематический вид экспериментальной установки ДИС-1 представлен на рис. 8, где 1 – вакуумная камера, 2 – плазменный источник, 3 – магнитная система, 4 – коаксиальные электроды, создающие E_r , 5, 6 – торцевые и осевые электроды для измерения ионной компоненты, 7 – крионасос – ВЧ-антенна.

Плазма из источника 2 движется вдоль силовых линий убывающего магнитного поля и выходит на коллекторы 5, расположенные в торце вакуумной камеры. При включении радиального электрического поля E_r плазма начинает вращаться в скрещенных радиальном электрическом поле и продольном магнитном поле H с частотой ω_E .

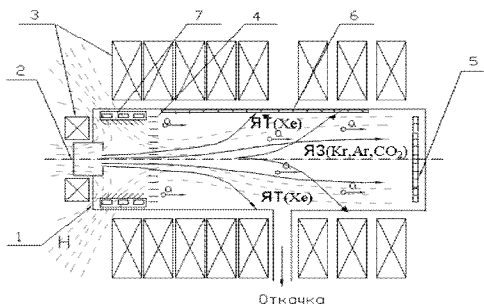


Рис. 8. Схема экспериментальной установки ДИС-1.

оси магнитного поля: $r_{ci} \cdot R / r_{ci} < L < 2\pi r_{ci} \cdot R / r_{ci}$, или $R < L < 6R$, где

При достижении условия $2\omega_E = \omega_{ci}$, где ω_{ci} – циклотронная частота иона с массой M в магнитном поле, наблюдается выход требуемых ионов на осевые коллекторы 6 и спад тока на торцевых коллекторах 5. Длина кольцевой зоны на стенках камеры, куда выходят ионы, имеет длину L вдоль

R – радиус плазмы, r_{ci} – ларморовский радиус резонансных ионов. Величины магнитных полей, при которых достигаются резонансные условия для различных компонент плазмы, выбирались из соотношения: $H_c = \sqrt{4Mc^2 E_r / e r}$ [9], вытекающего из решения уравнения (5).

На первом этапе имитационные эксперименты проводились на газах Хе, Кг, Аг, CO_2 . Результаты эксперимента со смесью Хе-Кг- CO_2 и индивидуальных газов Аг и CO_2 представлены на рис. 9: распределение токов на торцевой коллектор для плазмы Хе, Кг, Аг (а), для плазмы Аг (б), для плазмы Аг, CO_2 (в) и продольный коллектор (г). Минимумы на кривых согласуются с ожидаемой областью выхода ионов данной массы в соответствии с соотношением величин электрического и магнитного полей [16].

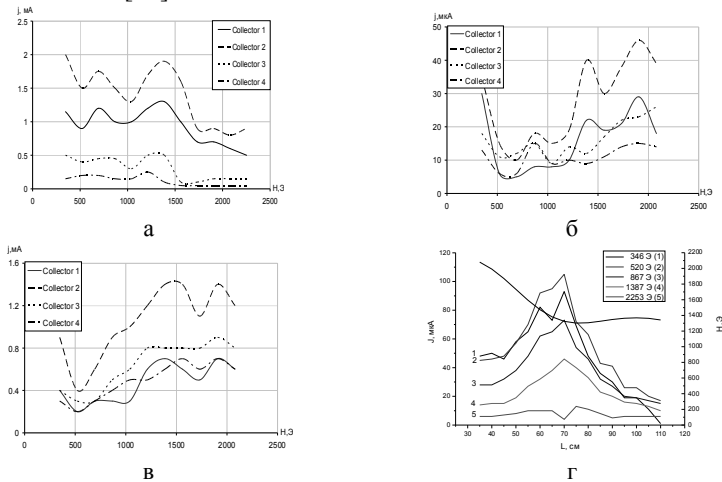


Рис. 9. Результаты имитационных экспериментов.

Некоторое смещение минимумов на кривых может объясняться радиальной неоднородностью магнитного поля на разных радиусах, на которых располагаются коллекторы.

Однако с газообразным рабочим телом за счет процесса рециклирования и неполной ионизации газа в плазменном источнике (степень ионизации плазмы составляет $\sim 15\%$), в процессах сепарации и транспортировки растет роль ион-нейтральных столкновений. Исходя из этого, целесообразен переход к рабочему телу с коэффициентом рециклирования $\rightarrow 0$. Поэтому была выбрана система, включающая Са,

K, Na, Li и вспомогательные элементы, Si, Cl, O, C, входящие в химические соединения и элементы конструкции ионно-плазменного распылительного элемента, создающего плазму. Использование щелочных металлов также целесообразно из-за близости их потенциалов ионизации к потенциалам ионизации урана (не только первого ~ 6 эВ, но и второго ~ 12 эВ). Поскольку двукратно ионизованный продукт удаляется с примесями, температура электронов должна быть значительно меньше 12 эВ, то есть около 3-5 эВ. В такой плазме преимущественно ионизируются металлы, частично углерод, в то время как кислород находится в атомарно-молекулярном состоянии.

При использовании щелочных металлов и наличии C, O, Cl будет сравнительно слабая связь конденсируемого слоя с материалом подложки, что приведет к значительному самораспылению, а потому к определенному расползанию слоя за заданную область осаждения за счет "распылительного рециклинга". Потому ионно-плазменное осаждение требует понижения энергии осаждающихся ионов с одной стороны и уменьшения температуры подложек – с другой. В первом случае понижение энергии осаждающихся ионов осуществляется путем подачи замедляющего ионы положительного потенциала на поверхность осаждения.

Выводы. Представлены результаты исследований плазмы, вращающейся в скрещенных $E \perp H$ полях для случая положительного потенциала на оси вращения. Теоретический и экспериментальный опыт показал, что при определенных соотношениях электрического и магнитного полей за счет энергии системы радиального электрического поля возможен нагрев и сепарация ионов многокомпонентной плазмы.

Список литературы: 1. Изотопы: свойства, получение, применение. В 2 т. Т.1 / Под ред. В.Ю. Баранова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 600 с. 2. Орлов А.А. Газофазные методы разделения. Ч. 1. // Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2009. – 286 с. 3. Пат. RU 2229924 С2 Плазменный фильтр масс и способ отделения частиц малой массы от частиц большой массы / Охкава Тихиро. – 2001. – № 122 156 /15. Заявл. 07.08.2001. 4. Рожков А.М., Степанов К.Н., Супруненко В.А., Фареник В.И., Власов В.В. Резонансное возбуждение ионно-циклотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях // УФЖ. – 1969. – Т. 14. – 1969. – №11. – С. 1856-1861. 5. Рожков А.М., Степанов К.Н., Супруненко В.А., Фареник В.И. Исследование возбуждения ионно-циклотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. – В. 1. – Киев: Наукова думка, 1971. – С.14-18. 6. Рожков А.М., Степанов К.Н. и др. Резонансная циклотронная неустойчивость во вращающейся плазме // Физика плазмы и проблемы

управляемого термоядерного синтеза. – В.3. – Киев: Наукова думка, 1972, – С. 193-202. 7. Власов В.В., Залюбовский И.И., Кирочкин Ю.А. и др. Пространственное распределение и вывод ионных компонентов вращающейся плазмы при развитой резонансной ионной циклотронной неустойчивости // Письма ЖЭТФ. – Т. 27. – Вып. 5. – 1978. – С. 264-267. 8. Авт. свидетельство №714997 "Способ разделения по массам смесей изотопов, элементов и соединений, находящихся в плазменном состоянии" / В.В. Власов, И.И. Залюбовский, М.Г. Кривонос, и др. Заявл. 15.10.1979. 9. Елисеев Ю.Н., Рожков А.М., Степанов К.Н. Ионная циклотронная неустойчивость вращающейся плазмы в скрещенных аксиальном магнитном и сильном радиальном электрическом поле // УФЖ. – Т. 27. – 1982. – №5. – С. 688-691. 10. Михайловский А.Б., Цытин В.С. Высоочастотная неустойчивость плазмы, находящейся в радиальном электрическом и продольном магнитном полях // Письма в редакцию ЖЭТФ. – Т. 3. – 1966. – Вып. 6. – С. 247-250. 11. Байбородов Ю.Т., Готт Ю.В., Иоффе М.С., Юшманов Е.Е. Неустойчивые состояния плазмы в ловушке с комбинированным полем // ЖЭТФ. – Т. 3. – 1966. – Вып. 2. – С. 92-96. 12. Litvak A., Agnew S., Anderegg F. et al. Archimedes Plasma Mass Filter // 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. – St. Petersburg (Russia). – 2003. – Vol. 27A, O-1.6A. 13. Тимофеев А.В. О переработке отработанного ядерного топлива электрическим методом // Физика плазмы/ – Т. 33. – 2007. – №11. – С. 921-927. 14. Егоров А.М., Юферов В.Б., Шарый С.В. и др. Экспериментальная электромагнитная плазменная установка ДИС-1 для имитационного разделения отработанного ядерного топлива. Предварительные результаты // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – №41. – С. 78-90. 15. Yegorov A.M., Yuferov V.B., Shariy S.V. et al. Preliminary study of the demo plasma separator // ВАНТ №1(59), Сер.: "Физика плазмы". – 2009. – №1(59). – С.122-124. 16. Юферов В.Б., Егоров А.М., Шарый С.В. и др.. Магнитоплазменная регенерация ОЯТ // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – №55. – С. 129-149.



Юферов Владимир Борисович, профессор, доктор технических наук, начальник отдела, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", yuferov@kipt.kharkov.ua. Защитил диплом инженера по специальности физика на физико-математическом факультете ХГУ, диссертацию кандидата и доктора физико-математических наук по специальности экспериментальная физика, соответственно в 1967, 1977 гг. Научные интересы: проблемы использования ядерных материалов и ядерных и радиационных технологий в сфере развития отраслей экономики, научные исследования в области атомной науки и техники.



Егоров Алексей Михайлович, доктор физико-математических наук, зам. ген. директора ННЦ "ХФТИ", Yegorov@kipt.kharkov.ua. Защитил диплом радиоинженера конструирования и технологии производства радиоаппаратов на радиотехническом факультете НТУ «ХПИ», диссертацию кандидата и доктора физико-математических наук по специальности физика плазмы, соответственно в 1972, 1990 гг.

Научные интересы: физика плазмы, плазменная электроника, плазменно-пучковый разряд.



Шарый Сергей Владимирович, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ". Защитил диплом инженера-физика по специальности защитные покрытия и материалы реакторостроения на физико-техническом факультете ХГУ в 1995г.

Научные интересы: физика плазмы, сепарация вещества на изотопы из плазменного состояния.



Друй Олег Самойлович, руководитель группы, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ". Окончил физико-математический факультет ХГУ в 1964 г.



Ильичева Вера Олеговна, ведущий инженер-исследователь ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", вул. ак.Курчатова, 17, кв.21,335-21-18, i-vera@yandex.ru. Окончила ХИРЭ по специальности прикладная математика в 1982г.

Научные интересы: математическое моделирование физических процессов, разработка магнитных систем.



Швец Михаил Олегович, инженер-исследователь ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончил ХГУ 1988г., по специальности экспериментальная ядерная физика. Научные интересы связаны с методами сепарации вещества по изотопам из плазменного состояния.



Свичкарь Александр Сергеевич, аспирант ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончил НТУ "ХПИ" в 2010 г. по специальности "Техника и электрофизика высоких напряжений".

Научные интересы: физика плазмы, диагностика плазмы при помощи зондовых измерений.



Ткачева Татьяна Ивановна, аспирант ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончила НТУ "ХПИ" в 2010 г. по специальности "Техника и электрофизика высоких напряжений".

Научные интересы: физика плазмы, зондовые методы диагностики плазмы.

*Поступила в редколлегию 02.11.2011
Рецензент д.т.н., проф. Баранов М.И.*

ISSN 2079-3944. Вісник НТУ "ХПІ". 2011. № 60

Б.И. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук, проф., зав. отделом, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

Т.Б. НИКИТИНА, канд. техн. наук, доц, НТУ "ХПИ", Харьков

И.В. БОВДУЙ, канд. техн. наук, научный сотрудник НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

А.В. ВОЛОШКО, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

Е.В. ВИНИЧЕНКО, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ
РЕГУЛЯТОРОВ СКОРОСТИ СТЕНДА ДВУХМАССОВОЙ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Розроблена математична модель і методика синтезу різних типів регуляторів швидкості стенду двомасової електромеханічної системи. Приведені експериментальні перехідні процеси стенду по швидкості з синтезованим регулятором.

Разработана математическая модель и методика синтеза различных типов регуляторов скорости стенда двухмассовой электромеханической системы. Приведены экспериментальные переходные процессы стенда по скорости с синтезированными регулятором.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. При синтезе систем управления сложными многомассовыми электромеханическими системами с упругими и нелинейными элементами используют стенды, имитирующие структуру объекта управления.

Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме. Исследовательские стенды для отладки программного обеспечения систем управления преобразователями с учетом особенностей кинематических связей между приводным двигателем и рабочим механизмом рассматриваются в работах [1-8].

Цель работы. Целью данной работы является разработка математической модели и методики синтеза типовых и робастных регуляторов скорости вращения двигателей стенда двухмассовой электромеханической системы, а также экспериментальное исследование динамических характеристик синтезированных систем на стенде.

Результаты исследований. Стенд двухмассовой электромеханической системы содержит две одинаковые электрические машины постоянного тока, роторы которых связаны между собой пружиной с жесткостью. На роторах каждой машины установлены оптические дискретные датчики углового положения, с помощью которых измеряются и угловые скорости роторов двигателей.

Для синтеза системы управления необходима математическая модель стенда как объекта управления. Рассмотрим математическую модель исследовательского стенда двухмассовой электромеханической системы при управлении скоростью валов двигателей.

Приведем основные уравнения динамики движения роторов первого и второго двигателей

$$J_{д1} \frac{d\omega_1}{dt} = M_{д1} - M_{\Sigma} - M_c(\omega_1);$$

$$J_{д2} \frac{d\omega_2}{dt} = M_{д2} + M_{\Sigma} - M_c(\omega_2).$$

В этих уравнениях суммарный момент M_{Σ} , передаваемый пружиной, равен сумме моментов упругости M_y и момента вязкого трения $M_{вт}$, так что

$$M_{\Sigma} = M_y + M_{вт}.$$

Для моментов упругости M_y и момента вязкого трения $M_{вт}$ получим следующие уравнения

$$M_y = C(\varphi_1 - \varphi_2);$$

$$M_{вт} = \beta(\omega_1 - \omega_2).$$

Так как упругий элемент – пружина является накопителем потенциальной энергии, то путем дифференцирования обеих частей исходного уравнения для упругого момента может быть получено следующее дифференциальное уравнение состояния для момента упругости

$$\frac{dM_y}{dt} = C(\omega_1 - \omega_2).$$

Моменты двигателей $M_{д1}$, $M_{д2}$ связаны с токами якорных цепей $I_{я1}$, $I_{я2}$ уравнениями

$$M_{д1} = C_1 \Phi_1 I_{я1};$$

$$M_{д2} = C_2 \Phi_2 I_{я2},$$

где C_1, C_2 – конструктивные постоянные двигателей; Φ_1, Φ_2 – потоки возбуждения двигателей.

Уравнения равновесия ЭДС якорных цепей двигателей имеют следующий вид

$$T_{\vartheta 1} \frac{dI_{я1}}{dt} + I_{я1} = \frac{1}{R_1} [U_{я1} - K_1 \Phi_1 \omega_{д1}];$$

$$T_{\vartheta 2} \frac{dI_{я2}}{dt} + I_{я2} = \frac{1}{R_2} [U_{я2} - K_2 \Phi_2 \omega_{д2}].$$

Так как частота коммутации широтно-импульсных преобразователей усилителей мощности УМ₁, УМ₂, питающих якорные цепи двигателей, составляет около 7 кГц, то динамикой этих усилителей можно пренебречь и считать их безинерционными. Тогда получим следующие уравнения, связывающие входные напряжения U_1, U_2 широтно-импульсных преобразователей с их выходными напряжениями, приложенными к якорным цепям $U_{я1}, U_{я2}$ двигателей:

$$U_{я1} = K_{ум1} U_1;$$

$$U_{я2} = K_{ум2} U_2,$$

где $K_{ум1}, K_{ум2}$ – коэффициенты усиления широтно-импульсных преобразователей.

Примем компоненты вектора переменных состояния в следующем виде: ток якорной цепи первого двигателя $I_{я1}$, скорость ω_1 вращения первого двигателя, момент упругости M_y пружины связывающей валы двигателей, скорость ω_2 вращения вала второго двигателя и ток якорной цепи второго двигателя $I_{я2}$. Тогда вектор состояния примет следующий вид

$$\vec{X}(t) = [I_{я1}, \omega_1, M_y, \omega_2, I_{я2}]^T.$$

Примем вектор управления в следующем виде

$$\vec{U} = [U_1, U_2]^T.$$

Примем вектор моментов сопротивления $\vec{M}$ в следующем виде

$$\vec{M} = [M_{c1}, M_{c2}]^T.$$

Тогда матрицы состояния А управления В и возмущения F примут следующий вид:

$$A = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline -\frac{1}{T_{\Sigma 1}} & \frac{-C_1 \Phi_1}{R_1 T_{\Sigma 1}} & & & \\ \hline \frac{C_1 \Phi_1}{J_{\text{д}1}} & \frac{-\beta - \beta_{c1}}{J_{\text{д}1}} & -\frac{1}{J_{\text{д}1}} & \frac{\beta}{J_{\text{д}1}} & \\ \hline & C & & -C & \\ \hline & \frac{\beta}{J_{\text{д}2}} & \frac{1}{J_{\text{д}2}} & \frac{-\beta - \beta_{c2}}{J_{\text{д}2}} & \frac{C_2 \Phi_2}{J_{\text{д}2}} \\ \hline & & & \frac{-C_2 \Phi_2}{R_2 T_{\Sigma 2}} & -\frac{1}{T_{\Sigma 2}} \\ \hline \end{array};$$

$$B = \begin{array}{|c|c|} \hline \frac{K_{\text{ум}1}}{R_1 T_{\Sigma 1}} & \\ \hline & \\ \hline & \\ \hline & \\ \hline & \frac{K_{\text{ум}2}}{R_2 T_{\Sigma 2}} \\ \hline \end{array}; \quad F = \begin{array}{|c|c|} \hline & \\ \hline -\frac{1}{J_{\text{д}1}} & \\ \hline & \\ \hline & -\frac{1}{J_{\text{д}2}} \\ \hline & \\ \hline \end{array}.$$

Результаты моделирования и экспериментальных исследований. Рассмотрим вначале переходные процессы с пропорциональным регулятором, замкнутым по скорости вращения второго двигателя. Переходные процессы переменных состояния показаны на рис. 1. Коэффициент усиления П-регулятор $K_p=0,15$ подобран таким образом, чтобы переходный процесс скорости вращения второго двигателя находился на границе устойчивости. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления пропорционального регулятора приводило к расходящимся переходным процессам. Как видно из рис. 1 переходный процесс по скорости в установившемся режиме имеет незатухающие колебания. Время первого согласования скорости вращения второго двигателя на уровне 6 рад/с составляет 1,4 с.

Рассмотрим переходные процессы в регуляторе скорости с П-регулятором при подаче на вход большого задающего воздействия, так что установившееся значение скорости вращения второго двигателя равно 20 рад/с, при этом время первого согласования скорости вращения второго двигателя уменьшилось до 0,8 с. Это, по-видимому, про-

изошло в связи с тем, что в начальный период времени переходного процесса произошло более быстрое страгивание первого и второго двигателей и влияние сухого трения уменьшилось.

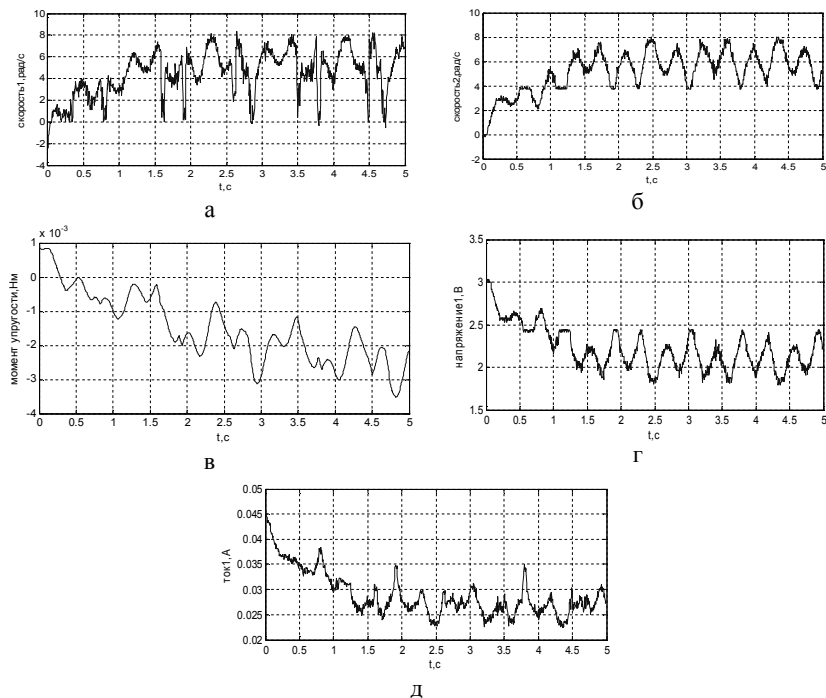


Рис. 1. Переходные процессы: а) скорости вращения первого двигателя; б) скорости вращения второго двигателя; в) момента упругости; г) напряжения на якровой цепи первого двигателя; д) тока якровой цепи первого двигателя с типовым П регулятором при разгоне двигателей до скорости 6 рад/с.

Рассмотрим теперь переходные процессы стенда по скорости с робастным регулятором. Переходные процессы переменных состояния показаны на рис. 2. Параметры робастного регулятора выбраны таким образом, что замкнутая этим регулятором система управления стендом также находится на границе устойчивости. Дальнейшее повышение быстродействия робастного регулятора приводило к потере устойчивости системы управления стендом. Как видно из рис. 2, время первого

согласования скорости вращения второго двигателя на уровне 20 рад/с составляет 0,8 с.

Для повышения быстродействия системы увеличим весовой множитель при ошибке системы в 10 раз. При этом время первого согласования уменьшилось в 3,2 раза и составляет 0,25с., однако в системе устанавливаются практически незатухающие колебания. Для уменьшения колебательности в системе с робастным регулятором добавим в вектор цели сигнал, пропорциональный моменту упругости с весовым множителем $C_1(3,2)=10^6$. При этом в системе с робастным регулятором перерегулирование уменьшилось и составляет 10% по скорости второго двигателя, однако время первого согласования увеличилось в 1,6 раз и составляет 0,4 с.

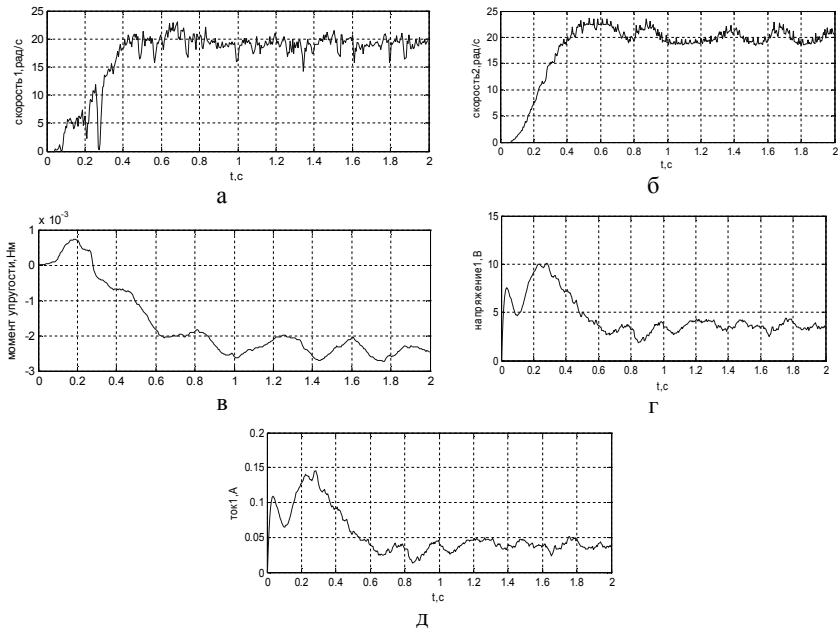


Рис. 2. Переходные процессы: а) скорости вращения первого двигателя; б) скорости вращения второго двигателя; в) момента упругости; г) напряжения на якровой цепи первого двигателя; д) тока якровой цепи первого двигателя с робастным регулятором при разгоне двигателей до скорости 20 рад/с.

Выводы из приведенного исследования, перспективы этого направления. Разработана математическая модель и методика синтеза типовых и робастных регуляторов скорости станда двухмассовой электромеханической системы. Приведены экспериментальные характеристики станда с синтезированной системой робастного управления. Применение робастного регулятора скорости вращения двигателей станда позволило уменьшить время первого согласования скорости вращения в 2 раза.

Список литературы: 1. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В. и др. Математическая модель станда двухмассовой электромеханической системы / Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2009. – №7. – С. 110-117. 2. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В. и др. Робастное управление стандом двухмассовой электромеханической системы // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Сер.: "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – Харків: НТУ "ХПИ", 2010. – №28. – С. 180-181. 3. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В. и др. Синтез робастного регулятора станда двухмассовой электромеханической системы / Технічна електродинаміка. Тем. випуск.: Силова електроніка та енергоефективність. – 2009. – Ч. 2. – С. 98 -103. 4. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Федорик Р.В. Практическая реализация цифровых САУ в среде пакета Матлаб с использованием платформы реального времени "QNX TARGET" // Вісник Національного політехнічного університету "ХПИ". Сер.: Електротехніка, електроніка і електропривод. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. – № 2. – С. 98-101. 5. Зеленев А.Б., Полилов Е.В., Щелоков А.Г. Создание универсального лабораторного макета системы прямого цифрового управления электроприводом// Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Сер.: Электротехника, электроника и электропривод. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. – № 12. – С. 472-475. 6. Войтенко В.П., Хоменко М.А. Встраиваемая система позиционирования с нейрорегулятором // Технічна електродинаміка. Тем. вип.: "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – С. 71-74. 7. Ан П. Сопряжение ПК с внешними устройствами: Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2003. –320 с. 8. Кузьминов А.Ю. Интерфейс RS232. Связь между компьютером и микроконтроллером. – М.: Радио и связь, 2004. – 168 с.



Кузнецов Борис Иванович, д.т.н., проф., заведующий отделом Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины. Защитил докторскую диссертацию в 1990 году по синтезу структур и оптимизации многоканальных квазиитерационных систем управления



Никитина Татьяна Борисовна, к.т.н., докторант кафедры системного анализа и управления Национального технического университета "ХПИ", защитила кандидатскую диссертацию в 2001 году по синтезу систем управления главными электроприводами блюминга в режиме пробуксовки валков



Волошко Александр Валерьевич, м.н.с. отдела проблем управления магнитным полем Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины



Бовдуй Игорь Валентинович, к.т.н., н.с. отдела проблем управления магнитным полем Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины



Виниченко Елена Владимировна м.н.с. отдела проблем управления магнитным полем Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины

*Поступила в редколлегию 02.11.2011
Рецензент д.т.н., проф. Луников В.С.*

О.Л. БАГМЕТ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

М.Е. ПОЗНЯКОВА, магистр, НТУ "ХПИ", Харьков

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ДИАМЕТРОМЕРА**

Розглянуто метрологічні характеристики трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕМП), що використовує для вимірювання діаметру немагнітного циліндричного провідного виробу змінно-частотний електромагнітний метод. Розраховано чутливість та похибки вимірювання діаметру за допомогою ТЕМП.

Рассмотрены метрологические характеристики трансформаторного электромагнитного преобразователя (ТЭМП), который использует для измерения диаметра немагнитного цилиндрического проводного изделия переменнo-частотный электромагнитный метод. Рассчитана чувствительность и погрешности измерения диаметра с помощью ТЭМП.

Введение. К настоящему времени в литературе рассмотрены многопараметровые электромагнитные методы и устройства для совместного измерения параметров цилиндрического изделия [1-2]. Для определения диаметра цилиндрического проводящего немагнитного изделия может быть применен электромагнитный переменнo-частотный метод, имеющий преимущества в бесконтактности и простоте своей реализации.

Диаметромер, реализующий указанный электромагнитный метод, благодаря своей простоте и надежности может использоваться при разбраковке прутков из немагнитных сталей и слабомагнитных материалов, когда нужна калибровка изделий по диаметру, например, при отборе прутков для станков с ЧПУ.

Цель работы – исследование метрологических характеристик электромагнитного диаметромера, поиск возможности повышения точности измерения диаметра изделий с помощью переменнo-частотного электромагнитного метода.

Основная часть. На рис.1 показана схема включения трансформаторного электромагнитного преобразователя с исследуемым цилиндрическим изделием. Схема содержит генератор Г синусоидальных

сигналов, частотомер Ч, амперметр А, измеряющий намагничивающий ток I до частот 1500 Гц. Ток более высокой частоты определяется вольтметром В1 по падению напряжений U_{R0} на образцовом сопротивлении R_0 . При этом $I = U_{R0} / R_0$.

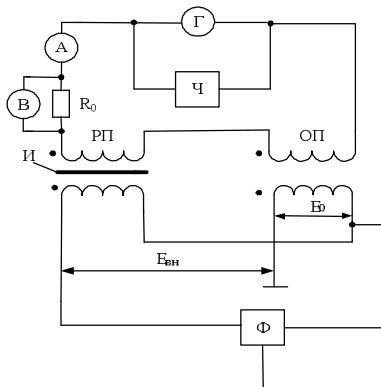


Рис. 1. Схема включения ТЕМП для измерения диаметра цилиндрического изделия.

Схема настраивается следующим образом. Во избежание нагрева изделия вихревыми токами напряженность H_0 магнитного поля внутри преобразователя должна быть небольшой (порядка 50 – 200 А/м). При этом, эффективное значение намагничивающего тока I должно быть порядка 100 – 150 мА, ток определяется из формулы

$$I_{\text{эф}} = \frac{H_0 l_n}{\sqrt{2} \cdot W_1 C}, \quad (1)$$

где W_1 - число витков намагничивающей обмотки, C – коэффициент, зависящий от отношения длины преобразователя к диаметру и при $l_n/d = 10$ равный 0,95; l_n – длина намагничивающей обмотки преобразователя.

Суть переменного-частотного метода состоит в поддержании постоянным значения фазового угла $\varphi_{\text{вн}} = \varphi_{\text{вн1}} = \text{const}$ при изменении диаметра изделия путем изменения частоты f магнитного поля. $\varphi_{\text{вн}}$ – фазовый угол вносимой ЭДС $E_{\text{вн}}$ ТЭМП, обусловленной магнитным потоком в цилиндрическом изделии при внесении его в преобразователь. Параметр $\varphi_{\text{вн1}}$ характеризует рабочую точку x_1 на универсальной функции преобразования $\varphi_{\text{вн}} = f(x)$, здесь x – обобщенный электромаг-

Схема включает в себя рабочий РП и опорный ОП трансформаторный электромагнитный проходной преобразователь (ТЭМП). В РП помещается исследуемое изделие И. Фазометр Φ регистрирует фазовый угол $\varphi_{\text{вн}}$ между вносимой ЭДС $E_{\text{вн}}$ и ЭДС E_0 , которая возникает на концах измерительной обмотки РП при отсутствии в нем изделия. Первичные обмотки РП, ОП включены последовательно – согласно, а вторичные обмотки РП и ОП соединены последовательно – встречно.

нитный параметр, характеризующий степень затухания магнитного поля в изделии, определяемый из соотношения

$$x = d/2 \sqrt{2\pi f \mu_0 \mu_r / \rho}, \quad (2)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала, μ_0 – магнитная постоянная; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Таким образом, достижение условия $\varphi_{\text{вн}} = \varphi_{\text{вн1}} = \text{const}$ при изменении радиуса изделия сводится к поддержанию с помощью изменения частоты f равенства $x = x_1 = \text{const}$. В этом случае для немагнитного изделия ($\mu_r = 1$) при известной марке материала, а, следовательно, известном значении ρ , существует однозначная зависимость между радиусом изделия и частотой f намагничивающего тока.

$$d = 2 \frac{x \sqrt{\rho}}{\sqrt{2\pi f \mu_0}}. \quad (3)$$

Данная схема не требует компенсации эффекта воздушного зазора, в связи с тем, что в ней используется в качестве параметров выходного сигнала вносимые значение ЭДС и ее фазы. Поэтому отпадает необходимость в измерении с помощью вольтметра ЭДС на измерительных обмотках преобразователей РП и ОП.

Рабочую точку $x = x_1$ выбираем в оптимальном по погрешности и чувствительности режиме работы преобразователя $1,5 \leq x \leq 4,5$, что соответствует максимальной крутизне характеристики $\varphi_{\text{вн}} = f(x)$. Постоянство значения $x = x_1$ достигается постоянством фазового угла $\varphi_{\text{вн1}}$, например, $\varphi_{\text{вн1}} = 56,738$ град, $\varphi_{\text{вн2}} = 35,697$ град, $\varphi_{\text{вн3}} = 24,432$ град [3].

Перепишем зависимость (3) в виде

$$d = 2 \frac{K_1}{\sqrt{f}}, \quad (4)$$

где K_1 – постоянный коэффициент для выбранной марки материала и значения рабочей точки x_1 ;

$$K_1 = \frac{x \sqrt{\rho}}{\sqrt{2\pi \mu_0}}, \quad (5)$$

Оценим значения коэффициента K_1 для исследуемых изделий из нержавеющей стали 1Х18Н10Т, алюминия и меди. Удельная электропроводность этих материалов: $\rho_{\text{стали}} = 72,8 \cdot 10^{-8}$ Ом м; $\rho_{\text{алюм}} = 2,6 \cdot 10^{-8}$ Ом м; $\rho_{\text{меди}} = 1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом м

Таблица 1 – Значение коэффициента K_1 для стали, алюминия и меди при различных x

x	K_1		
	алюминий	сталь	медь
1	0,057413	0,303802	0,046697
2	0,114826	0,607605	0,093394
3	0,17224	0,911407	0,140091
4	0,229653	1,215209	0,186788
5	0,287066	1,519011	0,233485
6	0,344479	1,822814	0,280182
7	0,401893	2,126616	0,326879
8	0,459306	2,430418	0,373577
9	0,516719	2,734221	0,420274
10	0,574132	3,038023	0,466971

Не смотря на нелинейность, крутизна градуировочной характеристики ТЭМП для изделия из стали довольно велика, что говорит о высокой чувствительности преобразователя к изменению радиуса изделия.

Для расчета чувствительности использовалось соотношение:

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta d} = \frac{f_{i+1} - f_i}{d_{i+1} - d_i},$$

где f_{i+1} и f_i – соответственно предыдущее и последующее значения частот, полученные по градуировочной характеристике ТЭМП; d_{i+1} и d_i – предыдущее и последующее значение радиуса.

На основании выражения (2) запишем формулу для электромагнитного параметра x , заменив ρ на σ , получим

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\mu_0 \mu_r \sigma \omega}, \quad (7)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Если $\mu_r = 1$, то формула (7) примет вид

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\mu_0 \sigma \omega}, \quad (8)$$

где $\omega = 2\pi f$.

Подставив значение ω в формулу (8) получим:

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\mu_0 \sigma 2\pi f} \quad (9)$$

С формулы (9) выразим диаметр

$$d = \frac{2x}{\sqrt{\mu_0 \sigma 2\pi f}} \quad (10)$$

Продифференцировав (10), получим

$$\frac{\delta d}{d} = 2 \frac{\delta x}{x} - \frac{1}{2} \frac{\delta \sigma}{\sigma} - \frac{1}{2} \frac{\delta f}{f}, \quad (11)$$

$$\frac{\delta x}{x} = \frac{dx}{d\varphi_{\text{вн}}} \cdot \frac{\varphi_{\text{вн}}}{x} \cdot \frac{\delta \varphi_{\text{вн}}}{\varphi_{\text{вн}}} \quad (12)$$

По формуле (12) найдем коэффициент влияния $C_{\varphi_{\text{вн}}}$, заменив дифференциал функции приращением, результаты расчета запишем в таблицу (2).

$$C_{\varphi_{\text{вн}}} = \frac{\Delta x}{\Delta \varphi_{\text{вн}}} \cdot \frac{\varphi_{\text{вн}}}{x} \quad (13)$$

Подставим выражения (12) и (13) в выражение (11):

$$\frac{\delta d}{d} = 2C_{\varphi_{\text{вн}}} \frac{\delta \varphi_{\text{вн}}}{\varphi_{\text{вн}}} - \frac{1}{2} \frac{\delta \sigma}{\sigma} - \frac{1}{2} \frac{\delta f}{f} \quad (14)$$

Найдем суммарную погрешность измерения диаметра, которую рассчитана при доверительной вероятности $P = 0,95$ согласно ГОСТ 8.207 – 76:

$$\gamma_d = 1,1 \sqrt{(2C_{\varphi_{\text{вн}}})^2 (\gamma_{\varphi_{\text{вн}}})^2 - \frac{1}{4} (\gamma_{\sigma})^2 - \frac{1}{4} (\gamma_f)^2}, \quad (15)$$

где $C_{\varphi_{\text{вн}}}$ – коэффициент влияния; $\gamma_{\varphi_{\text{вн}}} = 0,3\%$, относительная погрешность измерения фазового угла с помощью фазометра; $\gamma_{\sigma} = 0,2\%$, относительная погрешность измерения удельной электрической проводимости с помощью моста постоянного тока; $\gamma_f = 0,1\%$, относительная погрешность измерения частоты с помощью частотомера.

Результаты расчета погрешности занесены в табл.2.

Таблица 2 –Результаты расчета погрешности диаметромера.

$C_{\text{фвн}}$	x_1	$\Phi_{\text{вн}}$	x_1	$\Phi_{\text{вн}}$	$\gamma_a, \%$
-2,38991	1	80,54	0,9	83,91	1,572539
-1,19496	2	56,76	1,9	61,88	0,779023
-0,79664	3	35,69	2,9	39,05	0,511195
-0,59748	4	24,43	3,9	26,09	0,374667
-0,47798	5	18,64	4,9	19,55	0,290509
-0,39832	6	15,17	5,9	15,75	0,232349
-0,34142	7	12,79	6,9	13,21	0,188814
-0,29874	8	11,05	7,9	11,36	0,154111
-0,26555	9	9,73	8,9	9,97	0,124864
-0,23899	10	8,69	9,9	8,88	0,098768

На основании данных табл. 2 построены графики зависимости погрешности измерения диаметра, показанные на рис. 2.

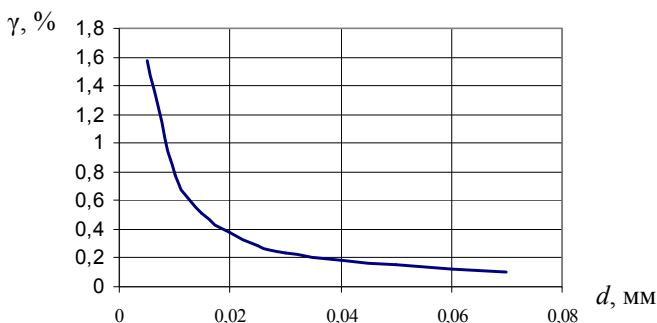


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности измерения диаметра.

Таким образом, с помощью ТЭМП возможно измерять переменнo-частотным методом диаметр цилиндрического изделия для конкретной марки немагнитного или слабомагнитного материала с известным значением удельной электрической проводимости.

Вывод. В статье рассмотрены метрологические характеристики ТЭМП, который использует для измерения диаметра немагнитного цилиндрического проводящего изделия переменного-частотный электромагнитный метод. Рассчитана чувствительность и погрешности измерения диаметра с помощью ТЭМП.

Список литературы: 1. Себко В.П., Сиренко Н.Н., Горкунов Б.М. Определение магнитных, электрических и геометрических параметров цилиндрических изделий // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1992. – №2. – С.39-43. 2. Сандовский В.А., Носальская Н.И. Исследование возможности разбраковки прутковой стали по маркам методом вихревых токов в двухпараметровом варианте // Дефектоскопия. – 1983. – № 6. – С.30-34. 3. Багмет О.Л., Львов С.Г. Бесконтактное измерение радиуса цилиндрического изделия переменного-частотным электромагнитным методом // Вестник НТУ "ХПИ" – 2010. – №4. – С.136-141.

*Поступила в редколлегию 02.11.2011
Рецензент д.т.н., проф. Гурин А.Г.*

В.К. ГУСЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, проф. НТУ "ХПІ", Харків
О.Є. ТВЕРИТНИКОВА, канд. істор. наук, доц. НТУ "ХПІ", Харків
Т.Б. БЕЛІКОВА, ст. викладач, ХГЕУ, Харків

УНИВЕРСАЛЬНИЙ МЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР

У статті дано опис, розробленого авторами, сучасного метеоцентру призначеного для виміру і аналізу метеорологічних параметрів навколишнього середовища на енергетичних, промислових і транспортних об'єктах. Приведена структурна схема та надана оцінка його точносних характеристик.

В статье дано описание, разработанного авторами, современного метеоцентра предназначенного для измерения и анализа метеорологических параметров окружающей среды на энергетических, промышленных и транспортных объектах. Приведена структурная схема и дана оценка его точностных характеристик.

Вступ. Сучасні метеоцентри мають широке розповсюдження на різноманітних енергетичних, промислових і транспортних об'єктах. Вони за спеціальними алгоритмами здатні одержувати і прогнозувати інформацію про навколишнє середовище на підставі отриманих даних за певний термін. Основними недоліками таких приладів є недостатня надійність і порівняно висока (від 1000 до 5000 доларів) вартість.

Мета роботи. Розробити метеоцентр для збору і аналізу інформації про вологість, температуру, тиск а також швидкість і напрям повітря, що за точністю вимірювань не уступає аналогічним вітчизняним та закордонним промисловим приладам і забезпечує високу надійність при собівартості до 200 доларів.

Принцип роботи і опис схеми метеоцентру. Робота метеоцентру заснована на зборі інформації з певної кількості датчиків параметрів навколишнього середовища, перетворення цієї інформації в вигляд, необхідний для виводу на екран прилада, а також аналізу інформації програмою ПК. Структурна схема метеоцентру наведена на рис.1. Мікроконтролер (pic16c745 компанії Мікрочип) збирає вхідні дані по десятиох каналах, з яких п'ять каналів від датчиків температури. Для підвищення надійності системи, у кожному каналі встановлено два датчика. Інформація надходить одночасно з обох датчиків, програма керування порівнює ці значення, і якщо інформація з обох датчиків відрізняється на неприпустиму величину яка, наприклад, перевищує в два рази максимальну похибку датчика, відбувається оповіщення опе-

ратора про несправність даного каналу прийому інформації.

Інформація від кожного з датчиків надходить по каналу зв'язку в мікроконтролер через один з його портів. Потім вона обробляється і заноситься в базу даних мікроконтролера. При переповненні об'єму пам'яті, вона автоматично стирається, і на це місце перезаписуються нові дані.

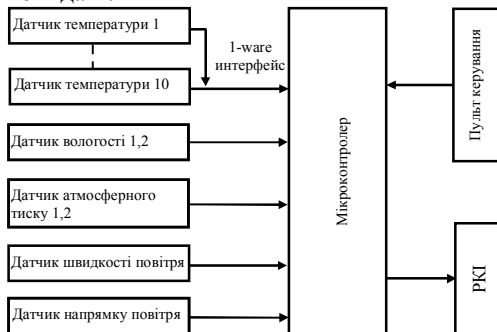


Рис. 1. Структурна схема метеостанції.

Мікроконтролер має у своєму складі вбудований апаратний інтерфейс USB 1.1, який набагато розширює можливості метеостанції в порівнянні з аналогічними пристроями, а саме:

- більш просте сполучення із ПК (у порівнянні з послідовним інтерфейсом RS-232);

- можливість підключення пристрою до ПК в "гарячому режимі" без перезавантаження системи;

- швидкість передачі даних набагато перевищує швидкість обміну через інтерфейс RS-232 (USB - 480 мБит/с; RS-232 - 115,2 кБит/с);

- оскільки метеостанція може перебувати на відстані від ПК, через інтерфейс USB нескладно організувати обмін інформацією із ПК через радіоканал за допомогою універсальної плати радіо подовжувача USB;

- крім того, через інтерфейс USB дана метеостанція може бути пов'язана з кожним із сучасних периферійних пристроїв (наприклад пристрою виводу – відображення інформації або FLASH-карти для зчитування бази даних вимірювань).

Рідкокристалічний індикатор (PKI) фірми Hitachi дозволяє метеостанції працювати в автономному режимі без джерела зовнішнього живлення. На індикатор оператор може вивести інформацію, що цікавить його в цей момент (наприклад, зміна температури в реальному режимі часу).

Всі настройки, а також керування роботою метеостанції можливо в двох режимах: з пульта керування або безпосередньо із ПК за допомогою програми керування.

Живлення пристрою здійснюється за допомогою зовнішнього стабілізованого джерела.

Температура вимірюється в п'ятьох незалежних крапках середовища, у кожній із крапок для підвищення надійності встановлено по два датчика температури. У схемі приладу передбачений збір інформації від 10 датчиків температури. Мікроконтролер через певні проміжки часу опитує кожний з датчиків по черзі, отриману інформацію записує в ПЗУ, порівнює пари отриманих значень і якщо вони відрізняються друг від друга на $\pm 1,0$ °C видає оператору сигнал про несправність одного з датчиків в конкретному місці вимірювань.

В якості датчиків температури обрано цифрові термоперетворювачі з вбудованими АЦП типу DS18B20U фірми – виробника MAXIM, що призначені для перетворення температури в діапазоні $(-55 - +125)$ °C в пропорційний цифровий код із заданою оператором точністю. Для цього в состав такого датчика введено перемикач таких значень похибок: 0,5; 0,25; 0,125 або 0,0625 °C. Сигнали з датчиків обробляються мікроконтролером, з виходу якого знімається цифровий код керування РКІ. Для вибраних датчиків температури в діапазоні вимірювань $(-55 \div 125)$ °C встановлено похибку 0,0625 °C тоді загальна похибка температурного каналу в робочому діапазоні $(-50 \div 70)$ °C не привисує ± 0.1 °C.

Обмін даними термоперетворювачів із мікроконтролером здійснюється по інтерфейсу 1-wire, що відбувається всього по одній лінії зв'язку в послідовному форматі. У момент опитування датчика його живлення здійснюється від порту контролера. У випадку відключення живлення від датчика на тривалий час, існує аварійний режим роботи, тобто останні виміряні значення зберігаються в його енергонезалежній пам'яті.

Схема підключення датчика до порту мікроконтролера показана на рис. 2.

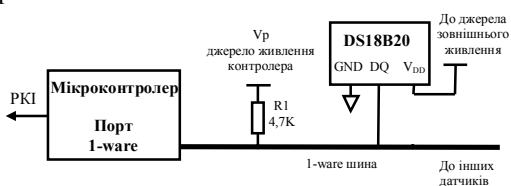


Рис. 2. Схема підключення датчика.

Створюється в цифрові значення і заноситься в базу даних мікроконтролера. Мікроконтролер через певні проміжки часу опитує обидва датчики по черзі, отриману інформацію записує в ПЗУ, порівнює обидва

В якості датчиків вологості обрано мікросхеми НІН-3610-001 фірми-виробника Honeywell. Два датчики підключається до мікроконтролера через вбудований в нього АЦП, інформація пере-

отримані значення і якщо вони відрізняються друг від друга, наприклад, на $\pm 10\%$ видає оператору сигнал про несправність одного з датчиків. Похибка датчика НН-3610-001 не перевищує $\pm 5\%$ в діапазоні вимірювань вологості $(0 \div 100)\%$. Точність перетворення АЦП ± 1 біт. Для підвищення точності вимірювань в схему підключення датчика до АЦП додано мікросхему джерела опорної напруги LT1019, у цьому випадку похибка, внесена самим АЦП не перевищує $0,02\%$ і результуюча похибка каналу вологості діапазоні $(1 \div 95)\%$ складає $\pm 5\%$.

В якості датчиків тиску обрані перетворювачі МРХ4100А фірми – виробника Motorola. Датчики тиску, також як датчики вологості, підключається до мікроконтролера через вбудований АЦП, інформація перетворюється в цифрові значення і заноситься в базу даних мікроконтролера. Мікроконтролер через певні проміжки часу опитує обидва датчики по черзі, отриману інформацію записує в ПЗУ, порівнює обое отриманих значень і якщо вони відрізняються друг від друга наприклад на $0,3$ кПа видає оператору сигнал про несправність одного з датчиків. Похибка каналу вимірювання атмосферного тиску не перевищує $\pm 0,2$ кПа в діапазоні $(90 \div 105)$ кПа.

Швидкість і напрямок повітря вимірюються за допомогою составного флюгерного датчика типу М-127 фірми – виробника "ООО Моснаб". Датчик підключено до мікроконтролеру через вбудований АЦП, аналогічно датчику тиску. Метеоцентр, з таким датчиком, забезпечує вимірювання швидкості повітря (V) в діапазоні $(2-60)$ м/с з похибкою, що не перевищує $\pm(0,3 + 0,04V)$ м/с і напрямку повітря в діапазоні $(0-360)^\circ$ з похибкою $\pm 1,0^\circ$.

Висновки. Універсальний метеорологічний центр, дозволяє збирати інформацію про температуру, вологість, атмосферний тиск, напрямок і швидкість повітря навколишнього середовища. з точністю, що перевищує точність аналогічних промислових приладів. У кожному каналу встановлено по два датчики, що суттєво підвищує його надійність і дає можливість використовувати розроблений метеоцентр у таких галузях, де насамперед важлива надійність отриманої інформації.

Список літератури 1. Юдин М.И. Новые методы и проблемы краткосрочного прогноза погоды / М.И. Юдин. – Л.: Энергия, 1993. – 132 с. **2.** Кондрашов С.И. Информационные технологии проектирования измерительных преобразователей / С.И. Кондрашов, В.К. Гусельников, Л.О. Медведева. и др. – Харьков НТУ "ХПИ", 2009. – 280 с.

*Надійшла до редколегії 01.11.2011
Рецензент проф. Сучков Г. М.*

И.В. НИЖЕВСКИЙ, инженер, НТУ "ХПИ", Харьков

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОМЕРЗАНИЯ
(ПРОСЫХАНИЯ) ВЕРХНЕГО СЛОЯ ЗЕМЛИ НА
СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА
ПОДСТАНЦИИ**

За результатами дослідження ЗП підстанцій обґрунтовано ефективність застосування вертикальних електродів по його периметру. Показано, що застосування горизонтальних електродів складного ЗУ повинно визначатись виходячи з умов електробезпеки. Підтверджено необхідність модернізації ЗУ підстанції замість існуючої реконструкції.

По результатам исследования ЗУ подстанций обоснована эффективность применения вертикальных электродов по его периметру. Показано, что применение горизонтальных электродов сложного ЗУ должно определяться исходя из условий электробезопасности. Подтверждена необходимость модернизации ЗУ подстанций вместо существующей реконструкции.

Введение. Общеизвестно, что подстанции всех классов напряжения имеют заземляющее устройство (ЗУ), которое в большинстве случаев представляет собой сложную конструкцию из горизонтальных и вертикальных электродов соединенных сваркой. Согласно ПУЭ [1] ЗУ должно обеспечивать в частности нормируемую величину сопротивления растеканию тока в земле в любое время года. Нормативными документами предусмотрено осуществлять периодическую проверку ЗУ путем измерения величины сопротивления растеканию с него тока в землю, а также выявления состояния и целостности электродов ЗУ. На протяжении ряда лет активно ведутся обследования ЗУ подстанций, на базе которых даются рекомендации по осуществлению их реконструкции [2-4]. Однако эффективность такой реконструкции, как показали исследования автора [5], достаточно низкая. Поэтому автором предложена модернизация ЗУ подстанций, которая заключается в применении двухуровневой конструкции заземлителя [6]. Это приводит не только к улучшению нормируемых параметров, но и к повышению надежности работы подстанций, а также улучшению условий электробезопасности и электромагнитной совместимости. При этом

возникает вопрос: как повлияет на вышеизложенное промерзание (просыхание) верхнего слоя земли? В литературе [7-9] нет достаточных данных для однозначного ответа.

Цель работы – исследовать изменение величины сопротивления ЗУ подстанции при промерзании (просыхании) верхнего слоя земли и дать рекомендации по выполнению их конструкции при проектировании и модернизации.

Принятые конструкции ЗУ и исходные условия эксперимента. Для исследования были приняты ЗУ подстанций как в виде конструкции из горизонтальных электродов (рис. 1), так и в виде горизонтальных и вертикальных электродов (рис. 2).

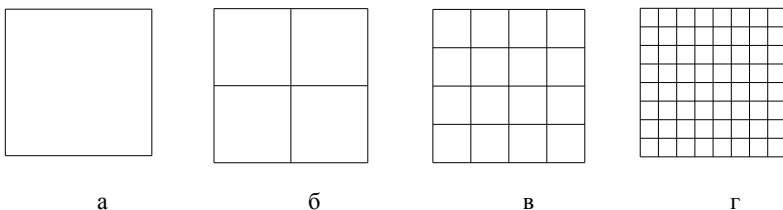


Рис. 1. Модель ЗУ в виде системы горизонтальных электродов.

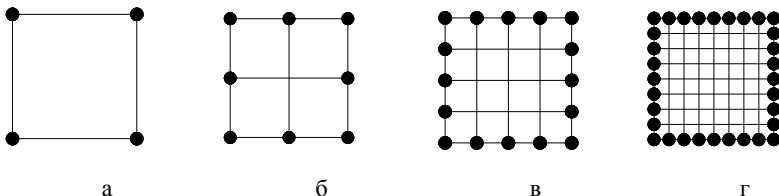


Рис. 2. Модель ЗУ в виде системы горизонтальных и вертикальных электродов.

В последнем случае вертикальные электроды размещаются по контуру (периметру) ЗУ из горизонтальных электродов. При этом площадь, занимаемая ЗУ, во всех случаях оставалась неизменной и равной $40 \times 40 \text{ м}^2$. Число и размер ячеек сетки ЗУ изменялись путем увеличения числа горизонтальных электродов, укладываемых равномерно внутри контура ЗУ, как это показано на рис. 1. Глубина укладки сетки l и размещение верхнего конца вертикальных электродов приняты равными 0,5 м. Число и длина l_v вертикальных электродов во всех случаях принимались такими, чтобы обеспечивалось равенство единице отношения a/l_v , т.е. суммарная длина вертикальных электродов равнялась длине контура ЗУ, а их эффективное использование было по

возможности неизменным и максимальным. Диаметр d горизонтальных и вертикальных электродов принят равным 16 мм. Модель структуры земли принята традиционной, т.е. двухслойной, удельное сопротивление ρ_1 земли верхнего слоя изменялось в пределах от 20 Ом*м до 10^4 Ом*м, а ρ_2 нижнего слоя принималось неизменным и равным 10^2 Ом*м. Толщина h верхнего слоя земли принята равной 1 м, а нижнего до ∞ . С целью упрощения ЗУ принято эквипотенциальным.

Результаты исследования и их анализ. Исследования, выполненные для принятых по рис. 1 а,б,в,г и рис. 2 а,б,в,г ЗУ по разработанной в пакете Mathcad программе, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры электродов

Размер ячейки, a , м	Удельное сопротивление верхнего слоя земли, ρ_1 , Ом*м	Длина вертикального электрода, l_v , м	Сопротивление ЗУ, R , Ом
40	20	0	0,928
		2	0,894
		20	0,762
	10^4	0	40,221
		2	1,512
		20	1,108
20	20	0	0,884
		2	0,861
		20	0,747
	10^4	0	26,695
		2	1,492
		20	1,098
10	20	0	0,86
		2	0,843
		20	0,738
	10^4	0	15,84
		2	1,454
		20	1,078
5	20	0	0,849
		2	0,835
		20	0,734
	10^4	0	8,667
		2	1,386
		20	1,039

Анализ полученных результатов позволяет отметить следующее.

Во-первых, применение только горизонтальных электродов по контуру в виде одной ячейки в случае увеличения удельного сопротивления ρ_1 земли верхнего слоя от $20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ до $10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ приводит к увеличению сопротивления ЗУ от $0,928 \text{ Ом}$ до $40,221 \text{ Ом}$, т.е. в $43,34$ раза. Увеличение числа ячеек при уменьшении их размеров до $5 \times 5 \text{ м}$ при $\rho_1 = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ приводит к снижению сопротивления от $0,928 \text{ Ом}$ до $0,849 \text{ Ом}$, т.е. в $1,093$ раза. При $\rho_1 = 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ аналогичное изменение конструкции сетки приводит к снижению сопротивления от $40,221 \text{ Ом}$ до $8,667 \text{ Ом}$, т.е. в $4,64$ раза.

Во-вторых, введение в конструкцию ЗУ, состоящего из горизонтальных электродов, вертикальных электродов по контуру приводит к существенному уменьшению величины его сопротивления. Это обусловлено тем, что часть вертикального электрода располагается во втором слое земли. Так, например, при длине вертикальных электродов $l_b = 2 \text{ м}$, расположенных по контуру ячейки размером $40 \times 40 \text{ м}$, изменение отношения ρ_1/ρ_2 от $0,2$ до 100 приводит к увеличению сопротивления ЗУ от $0,894 \text{ Ом}$ до $1,512 \text{ Ом}$, т.е. в $1,69$ раза. Увеличение числа ячеек при уменьшении их размеров до $5 \times 5 \text{ м}$ при аналогичном изменении отношения ρ_1/ρ_2 приводит к увеличению сопротивления от $0,835 \text{ Ом}$ до $1,386 \text{ Ом}$, т.е. в $1,66$ раза. Кроме того, при отношении $\rho_1/\rho_2 = 0,2$ увеличение числа ячеек при уменьшении их размеров до $5 \times 5 \text{ м}$ приводит к снижению сопротивления от $0,894 \text{ Ом}$ до $0,835 \text{ Ом}$, т.е. в $1,07$ раза. Аналогичное снижение при отношении $\rho_1/\rho_2 = 100$ составляет от $1,512 \text{ Ом}$ до $1,386 \text{ Ом}$, т.е. в $1,09$ раза. Следовательно, применение вертикальных электродов даже длиной $l_b = 2 \text{ м}$ приводит к существенному снижению сопротивления ЗУ подстанции. Увеличение длины l_b вертикальных электродов от 2 м до 20 м , т.е. в 10 раз, приводит к снижению сопротивления ЗУ подстанции следующим образом: в случае одной ячейки при $\rho_1/\rho_2 = 0,2$ сопротивление снижается от $0,894 \text{ Ом}$ до $0,762 \text{ Ом}$, т.е. в $1,17$ раза, а при $\rho_1/\rho_2 = 100$ аналогичное снижение составляет от $1,512 \text{ Ом}$ до $1,108 \text{ Ом}$, т.е. в $1,36$ раза. В то же время при размерах ячеек $5 \times 5 \text{ м}$ при $\rho_1/\rho_2 = 0,2$ сопротивление снижается от $0,835 \text{ Ом}$ до $0,734 \text{ Ом}$, т.е. в $1,14$ раза, а при $\rho_1/\rho_2 = 100$ аналогичное снижение составляет от $1,386 \text{ Ом}$ до $1,039 \text{ Ом}$, т.е. в $1,33$ раза. Кроме того, при длине вертикальных электродов $l_b = 20 \text{ м}$ увеличение числа ячеек ЗУ подстанции, т.е. до размеров $5 \times 5 \text{ м}$ при $\rho_1/\rho_2 = 0,2$ приводит к снижению сопротивления ЗУ от $0,762 \text{ Ом}$ до $0,734 \text{ Ом}$, т.е. в $1,038$ раза, а при $\rho_1/\rho_2 = 100$ аналогичное снижение составляет от $1,108 \text{ Ом}$ до $1,039 \text{ Ом}$, т.е. в $1,04$ раза.

Увеличение числа ячеек ЗУ подстанции при неизменных размерах занимаемой им площади, т.е. фактически увеличение числа горизонтальных продольных и поперечных электродов, оказывает значительно меньшее влияние на снижение сопротивления ЗУ подстанции, чем применение вертикальных электродов. Тем более промерзание (просыхание) земли и расположение заземляющей сетки в верхнем слое (слое промерзания или просыхания) указывает на малоэффективное ее использование в обеспечении требуемой величины сопротивления ЗУ подстанций. Количественно это подтверждается следующим. Если сопротивление ЗУ подстанции в виде контура (ячейка с размером 40х40 м) при отношении $\rho_1/\rho_2 = 0,2$ составляет 0,928 Ом, то добавление к контуру вертикальных электродов длиной по 2 м дает сопротивление равное 0,894 Ом, т.е. снижение составляет 3,7 %. Увеличение числа ячеек ЗУ без вертикальных электродов дает сопротивление 0,849 Ом, а добавление вертикальных электродов длиной по 2 м дает сопротивление 0,835 Ом, т.е. снижение на 1,65 %. В случае, если отношение $\rho_1/\rho_2 = 100$, ЗУ в виде контура (ячейка 40х40 м) имеет сопротивление 40,221 Ом, а с добавлением вертикальных электродов длиной по 2 м сопротивление составляет 1,512 Ом, т.е. снижается в 26,6 раза. В то же время увеличение числа ячеек (увеличение числа продольных и поперечных электродов) обеспечивает величину сопротивления 8,667 Ом, а добавление вертикальных электродов длиной по 2 м обеспечивает величину сопротивления равную 1,386 Ом, т.е. сопротивление снижается в 6,25 раза.

Вывод. Исследования показали, что в обеспечении требуемой минимальной величины сопротивления растеканию ЗУ подстанции основную роль играют вертикальные электроды, располагаемые по периметру контура ЗУ. Горизонтальные электроды (продольные и поперечные) должны использоваться в минимально возможном количестве, которое должно определяться исходя из условий электробезопасности, а это требует проведения дополнительных исследований. Полученные результаты следует рекомендовать к использованию при проектировании и модернизации ЗУ подстанций.

Список литературы: 1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – Х.: ІНДУСТРІЯ, 2007. – 416 с. 2. Борисов Р.К., Колиушко Г.М., Гримуд Г.И. и др. Методика исследования заземляющих устройств объектов электроэнергетики // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 4. – С. 29-32. 3. Колиушко Г.М., Носулько В.Д., Воронина З.А., Колиушко Д.Г. Опыт обследования заземляющих устройств подстанций напряжением 150 кВ Запорожских Восточных электрических сетей // Энергетика и электрифика-

ция. – 2000. – № 7. – С. 24-26. **4.** Борисов Р.К, Колечицкий Е.С., Горшков А.В., Балашов В.В. Методика и технические средства для диагностики состояния заземляющих устройств энергообъектов // Электричество. – 1996. – № 1. – С. 65-67. **5.** Нижевский И.В., Нижевский В.И. Экспериментальное исследование двухуровневого заземляющего устройства подстанции на физических моделях // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №5/6 (41). – С. 61-65. **6.** Пат. 18292, Украина, МПК H02B 1/00. Пристрій заземлення / В.І. Ніжєвський, І.В. Ніжєвський, В.І. Гуль – № u200603019. Заявлено 21.03.2006. Опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11. – 3 с. **7.** Заземляющие устройства на линиях электропередачи и подстанциях высокого напряжения. Итоги науки и техники. Электрические станции, сети и системы. – М.: Изд-во ВИНТИ, 1966. – С. 65-184. **8.** Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. – М.: Энергия, 1978. – 224 с. **9.** Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.



Нижевский Илья Викторович. Защитил диплом инженера в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" по специальности электрические системы и сети в 2007 г. Научные интересы связаны с проблемами молниезащиты, заземляющих устройств, перенапряжений и координации изоляции в электрических сетях.

Поступила в редколлегию 01.10.2011
Рецензент

ABSTRACTS

ELECTRICAL APPARATUS

Varshamova I.S., Geljarovskaja O.A., Krjukova N.V., Lupikov V.S., Rudas Ju.D., Savshenko K.A.

PROSPECTS OF AUTOMATIC SYSTEMS APPLICATION IN POWER SUBSTATIONS FOR THEIR MAGNETIC FIELD COMPENSATION.

An analysis of external magnetic field levels in power substations is resulted. Possibilities of parametrical systems application in power substations for their magnetic field compensation are proved.

Index terms – power substations, magnetic field, compensation, parametrical systems.

Guk A.A.

ANALYSIS OF AUTOMATIC DIAGNOSTICS ACCURACY IN MEASURING SIGNALS.

An analysis of automatic diagnostics accuracy at measuring signals is resulted for intrinsic losses in a power transformer model in one of its operation mode.

Index terms – power transformer, intrinsic losses, automatic diagnostic, accuracy.

Krugova O.S., Grischuk Ju.S.

AUTOMATION OF ELECTRIC CONVECTORS TESTING.

The block diagram used for automation of electric convectors testing is developed. The base microcontroller for carrying out of testing is chosen. An algorithm of the convector testing in its various operating modes is developed.

Index terms – electric convectors, testing, automation, algorithm.

Mazmanian R.O.

EQUIVALENT CIRCUITS OF GALVANOMAGNETIC HALL CONVERTERS USING GIRATOR AND SPICE-MMACRO-MODELS.

New phenomenological equivalent schemes of Hall converters with structural division their properties onto constant and variable ones are described using gyrators and four-poles components and their connections. The macro model equations considered primary and secondary effects in the Hall converters and their testing are resulted.

Index terms – Hall converter, equivalent schemes, gyrator, four-poles components.

Sedova E.A.

METHODS OF INDIRECT MEASUREMENT OF CURRENTS IN ELECTRIC DEVICES.

Analysis of measuring systems using Hall transformers the for indirect measurement of electric devices parameters are resulted.

Index terms – electric devices, currents, indirect measurement, Hall transformer.

Codik I.A.

APPLICATION OF NUMERICAL MODELLING AT COMPUTATING AND DESIGNING OF AIR TRANSFORMERS.

An algorithm computing multiphysics parameters in a block of the air transformer intended for a galvanic outcome of the thyristor frequency converter by COMSOL is described. The algorithm takes into account vertical currents from the magnetic fields crossing conductors in a cross-section direction.

Index terms – air transformer, parameters, vertical currents, computation, algorithm.

Chepelyuk A.A., Khlobystin A.L.

INFLUENCE OF TECHNICAL CONDITIONS IN INTRAHOUSE DISTRIBUTIVE NETWORKS ONTO THE ELECTRICAL SECURITY OF HOUSEHOLD SINGLE-PHASE CONSUMERS OF ELECTRIC ENERGY.

Influence of technical conditions in intrahouse distributive networks onto the electrical security of household single-phase consumers of electric energy is analyzed.

Index terms – household consumer, intrahouse distributive network, technical conditions, electrical security.

ELECTRICAL MACHINES

Galaiko L.P.

IMITATING MODELLING OF THE RECUPERATIVE BRAKING WORKING MODE OF OPERATION IN A SWITCH RELUCTANT MOTOR INTENDED FOR MINER ELECTRIC LOCOMOTIVES.

Modeling transients from the motor to recuperative braking operation by SIMULINK of the MATLAB software package is got up for the switch

reluctant motor. The developed imitating models and computing dates are resulted for the motor of 27 kW and 1215 rpm.

Index terms – **switch reluctant motor, transients, modeling.**

Egorov A.V., Naniy V.V., Yhimchuk V.D., Pototskiy D.V.

CHOICE OF THE OPTIMUM MATERIAL FOR A CORE IN THE ELECTRIC MOTOR WITH ROLLING ROTOR BY NUMERICAL METHODS.

Thermal conditions in the electric motor with rolling rotor are considered in view of using various steels in its massive core and taking into account inconstancy of the heat conductivity factor. Optimization of the core design is got up.

Index terms – **electric motor, rolling rotor, optimisation.**

Milykh V.I., Shpatenko V.S., Kuzmin V.V.

DAMAGE SOURCES OF GLUED PACKAGES IN STATOR CORE OF LARGE TURBOGENERATOR.

An analysis of damage sources of glued packages in stator cores of large turbogenerators with equal structural and technological basis (TVV-320 and TGW-300) is resulted.

Index terms – **turbogenerator, stator core, glued package, damage sources.**

Mishin V.I., Kaplun V.V., Chujenko R.M., Gavriljuk V.V.

PROPERTIES OF COMPENSATED ASYNCHRONOUS MOTORS WITH COMBINED STATOR WINDINGS.

Basic electric schemes and properties of asynchronous motors with combined working and compensating stator windings are analyzed. Recommendations about their practical use are given.

Index terms – **compensated asynchronous motor, stator, combined windings, electric schemes.**

Codik I.A., Hudobin K.V., Bakajev O.V.

TEST OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR IN THE MULTISPEED ELECTRIC DRIVE.

Test of the asynchronous motor intended for the multispeed electric drive powered from the special device with rotation control is got up and the drive working ability is estimated for two frequencies of rotation.

Index terms – **asynchronous motor, multispeed electric drive, rotation control, testing.**

Batygin Ju.V., Gnatov A.V., Gnatova Sch.V., Chaplygin Je.A.

TRANSITIVE PROCESS OF CAPACITOR STORE DISCHARGE IN THE MAGNETO-PULSE INSTALLATION.

Analysis of charge contours parameters influence on the transients proceeding in magneto-pulse installation at its capacitor store discharge is carried out. Analytical parities for computation of its current are received. Influence of active resistance and inductance in the charge contour on proceeding electromagnetic processes is investigated at the discharge. A recommendation on delaying a switch from the charge contour is proved.

Index terms – **magneto-pulse installation, capacitor store, discharge, transitive process.**

Golik O.V., Khorugina V.V., Toloshnja Ju.P.

NEW MATERIALS FOR POWER CABLES OF MIDDLE VOLTAGE.

Prospects of new materials use in manufacture of power cables of 20-35 kV are considered. Trends in using of traditional paper-impregnated insulation, insulation of cross-linked polyethylene and ethylene propylene rubber are analyzed. Comparative characteristics of various types of modern insulation used in manufacture of medium voltage cables are resulted.

Index terms – **power cables, middle voltage, insulation, new materials, prospects.**

Schebeniuk L.A., Antonec T.Ju., Kotchin I.S.

DETERMINATION OF SHIFTING ABILITY OF POWER CABLE, LAID IN APARTMENT.

Factors of reloading ability and heat transfer are experimentally estimated for APPA 32x5-1 cable, laid indoors.

Index terms – **power cable, reloading ability, heat transfer, estimation.**

Yuferov V.B., Yegorov A.M., Shariy S.V., Druy O.S., Ilichova V.O., Shvets M.O., Svichkar A.S., Tkachova T.I.

ABOUT SOME FEATURES OF SEPARATION DEVICES WITH ROTATING PLASMA IN CROSSED ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS.

Researches of cylindrical plasma, rotated in crossed electric and magnetic fields are resulted. Computations and experiments showed that at certain correlations of electric and magnetic fields heating and separation of different kinds of ions are possible due to power supply of radial electric-

field system.

Index terms – plasma centrifuge, rotating plasma, ion-cyclotron instability.

ELECTROTECHNOLOGIES USEGE

Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovduj I.V., Voloshko A.V., Vini-chenko E.V.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF DYNAMIC CHARACTERISTICS FOR THE TWO-MASS ELECTROMECHANICAL IMITATION STAND WITH DIFFERENT SPEED REGULATORS.

The mathematical model and synthesis technique are developed for various types of speed regulators intended for the imitation stand of two-mass electromechanics system. Experimental transients of the stand are resulted in view of the synthesised regulator speed.

Index terms – two-mass electromechanics system, experimental research, speed different regulators.

DEVICES AND METHODS OF NOT DESTROYING CONTROL

Bagmet O.L., Poznyakova M.Je.

RESEURCH OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS IN THE ELECTROMAGNETIC DIAMETROMER.

The metrological characteristics of the transformal electromagnetic converter used for measuring of diameter in the non-magnetic cylindrical wire by variable-frequency electromagnetic method are resulted. The method sensitivity and accuracy are computed.

Index terms – electromagnetic diametrometer, transformation electromagnetic converter, variable-frequency electromagnetic method, metrological characteristics.

Guselnikov V.K., Tveritnikova O.Je., Belikova T.B.

UNIVERSAL METEOROLOGICAL CENTER.

The modern meteocenter developed by authors intended for measurement and analysis of environment meteorological parametres in power, industrial and transport facilities is described. The meteocenter block diagramme is resulted and measuring accuracy characteristics are given.

Index terms – sensor, measuring accuracy, meteorological center, block diagramme, measuring accuracy.

Nizhevskiy I.V.

RESEARCH OF SUBSTATION GROUNDING IFLUENCED BY TOP FROZEN (DRYING) SOIL LAYERS.

Efficiency of vertical electrodes which had on perimetre of substation groundings is investigated. It is shown, that application of horizontal electrodes in complex groundings should be defined proceeding from electrosecurity conditions. Necessity of modernisation of substation groundings instead of existing reconstruction is confirmed.

Index terms – **substation, grounding, vertical electrodes, modernization.**

ВИМОГИ

до оформлення статей у Віснику Національного
технічного університету "ХПІ",
тематичний випуск **"Проблеми удосконалення електричних машин
і апаратів. Теорія і практика"**

Направлення (рубрики) тематичного випуску:

- електричні апарати;
- електричні машини;
- теоретичні основи електротехніки;
- сильні електричні та магнітні поля;
- електричні станції;
- комп'ютерне моделювання;
- використання електротехнологій;
- пристрої та методи неруйнівного контролю;
- електричний транспорт;
- інформація, гіпотези, думки.

Оформлення основних елементів статті – за зразком нижче. Оригінал статті готується в редакторі *Microsoft Word* (2000-2003) на українській / російській мові. Формат листа – А5. Поля: низ – 25 мм, інші – по 20 мм. Між елементами статті інтервал в один порожній рядок 10 pt.

Стаття відправляється в редакцію в друкарському варіанті (1 прим.) та в електронному варіанті по E-mail або на диску (без колонти-тулів і нумерації сторінок). Друкарський варіант надається на листах білого паперу формату А4 щільністю 80-90 г/м², надрукованих на лазерному принтері з роздільною здатністю не менше 300 dpi, на одній стороні листа.

Починаючи з 2011 р. всі статті проходять незалежне рецензування з підписом рецензента наприкінці статті.

До статті додаються (по 1 прим.):

1 СУПРОВІДНИЙ ЛИСТ, де вказується направлення (рубрика), за яким рекомендується публікація статті, й перелік документів наведених нижче.

2 АКТ ЕКСПЕРТИЗИ (для громадян України) або офіційний лист з проханням опублікувати статтю (для громадян зарубіжних країн).

3 АНОТАЦІЯ АНГЛІЙСЬКОЮ МОВОЮ (приклад приведений нижче).

4 ДАНІ ПРО АВТОРІВ на мові статті (прізвище, ім'я, по батькові повністю, організація, посада, поштова адреса, телефон, E-mail).

5 КОПІЯ ДОКУМЕНТА ПРО ОПЛАТУ за публікацію.

Друкарські матеріали статті відправляють за адресою:
**Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21,
м. Харків, 61002, Україна.**

Електронний варіант відправляють за адресою:

lupikov@kpi.kharkov.ua

Довідки за тел.:

відповідальний редактор Лупіков Валерій Сергійович

(057) 707 68 64, mob. 0674923709

секретар Себякина Наталія Валентинівна, **mob. 0667353882.**

УДК ... (10 pt)

Б.І. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук, проф., зав. відділом, НТЦ МТО
НАН України, Харків

Т.Б. НΙΚΙΤΙΝΑ, канд. техн. наук, докторант, НТУ "ХПІ", Харків

БУАКЛІН МОХАММЕД АЛІ, аспірант, НТУ "ХПІ", Харків

НАЗВА

(10 pt, жирний, вирівнювання по лівому краю з відступом 0,75 см.,
заголовні букви, без перенесень і скорочень)

Текст анотації (9 pt) англійською мовою, до 5 рядків.

Текст анотації (9 pt) російською мовою, до 5 рядків.

Текст анотації (9 pt) українською мовою, до 5 рядків (для громадян України).

Вступ. У журналі публікуються результати досліджень і огляди в області електричних машин і апаратів, сильних електричних і магнітних полів, теоретичної електротехніки, електричного транспорту, світлотехніки, що не публікувалися раніше (10 pt).

Мета, завдання дослідження.

Назва розділу і результати розв'язання завдання. Зміст структурується згідно вимогам постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 р. Стаття складається з розділів, назви яких відображають актуальність і стан проблеми, методи дослідження, результати теоретичних і/або експериментальних досліджень, аналіз результатів, перспективи використання.

Висновки.

Список літератури: література, електронні ресурси.

В кінці статті приводиться фото кожного автора з короткою інформацією (9 pt).

Текст оформляється шрифтом **Times New Roman** 10 pt з одиночним міжрядковим інтервалом. Абзаци відступи – 0,75 см. Назва розділу оформляється жирними буквами.

Математичні формули створюються у вигляді окремих об'єктів в редакторі формул **Microsoft Equation**. Розміри (pt): звичайний – 10, крупний індекс – 8, дрібний індекс – 6, крупний символ – 16, дрібний символ – 10. Стиль: текст, змінна – курсив; матриця, вектор – напівжирний курсив; інші – нормальний без нахилу. Формули розташовуються по центру і нумеруються в межах статті, номер – праворуч:

$$N = \tau_{u \max} / T_{mi} , \quad (1)$$

де $N - \dots; \tau_{u \max} - \dots; T_{mi} - \dots$.

Однакові символи в тексті і формулах повинні співпадати.

Ілюстрації (рисунок, фото, діаграми) і *таблиці* (9 pt) оформляються за зразком без назв, всі пояснення – в тексті. Рисунок оформляється в редакторі **Microsoft Word** як окремі об'єкти в тексті. Рисунок та таблиці відокремлюються від тексту інтервалом в один порожній рядок 10 pt.

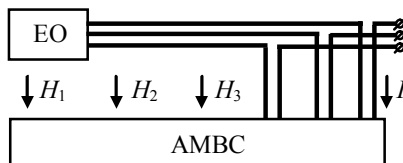


Рис. 1 – Структурна схема вимірювань поля.

Таблиця 1 – Вимоги щодо оформлення таблиці

Поле ліворуч	20 мм
Поле праворуч	20 мм
Поле зверху	20 мм
Поле знизу	25 мм

Список літератури оформляється за зразком, згідно стандарту ДСТУ 7.1-2006.

Посилання на математичні формули, ілюстрації, таблиці, джерела інформації даються за зразком: (1), (2)-(4); рис. 3, рис. 4,а; табл. 2; [5], [2-5].

Список літератури: 1. Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита. – К: Каравелла, 2005 – 344 с. 2. Юферов В.Б., Егоров А.М., Шарый С.В. и др. Магнитоплазменная регенерация ОЯТ //

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тематичний вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – № 40. – С. 66-83.

3. Пат. 31677, Україна, МПК G01R 33/00. Пристрій для компенсації змінного магнітного моменту струмів / О.Г. Король, В.С. Лупіков, О.Г. Серeda та ін. – № u200708718. Заявлено 30.06.2007. Опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8. – 3 с.

4. Бібліотека і доступність інформації у сучасному світі: електронні ресурси в науці, культурі і освіті / Л.Й. Костенко, А.О. Чекмарьов, А.Г. Бровкін, І.А. Павлуша // Бібліотечний вісник. – 2003. – № 4. – С. 43. – Режим доступу до журналу: <http://www.nbugov.ua/articles/2003/03klinko.htm>.

Фото авторів (2,5×3 см, не менше 300 dpi). Для кожного автора: прізвище, ім'я, по батькові; вчений ступінь; дати захисту дипломів і дисертацій, місце захисту; місце роботи, посада; короткий опис напрямів наукової діяльності – за зразком, інші відомості – на розсуд автора.



Лупіков Валерій Сергійович, професор, доктор технічних наук. Захистив диплом інженера, дисертації кандидата і доктора технічних наук в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини і апарати, відповідно в 1973, 1987 і 2004 рр. Завідувач кафедри "Електричні апарати" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 2005 р. Наукові інтереси пов'язані з проблемами фізичних полів електричних апаратів, електромагнітної сумісності технічних засобів, магнетизму технічних об'єктів, магнітною левітацією.

Надійшла до редколегії 24.03.2009

АНОТАЦІЯ АНГЛІЙСЬКОЮ МОВОЮ

Guk A.A.

APPLICATION OF THE THERMAL MODEL TO POWER AUTOTRANSFORMER FOR COMPUTATION OF ITS ELEMENTS HEATING WITH ACCOUNT OF OPERATION MODE.

In clause, the thermal model of power autotransformer is considered. That allows estimating its elements temperature in modes of operation. Comparison of computations on the GOST 14209-96 techniques and the offered thermal model are resulted.

Index terms – **power autotransformer, thermal model, computations.**

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

**ВАРШАМОВА И.С., ГЕЛЯРОВСКАЯ О.А., КРЮКОВА Н.В.,
ЛУПИКОВ В.С., РУДАС Ю.Д., САВЧЕНКО К.А.**

Перспективы применения автоматической компенсации магнитного поля
электрических подстанций 3

ГУК А.А.

Анализ точности сигнала измерительной информации для автоматиче-
ского диагностирования 10

КРУГОВА О.С., ГРИЩУК Ю.С.

Автоматизація досліджень електроконвекторів 17

МАЗМАНЯН Р.О.

Схемы замещения с гиратором и spice-макромодели гальваномагнитных
преобразователей Холла 21

СЕДОВА Е.А.

Измерение температуры контактов электрического аппарата при нагреве
в составе распределительного устройства 37

ПОДИК И.А.

Применение численного моделирования в расчетах и конструировании
воздушных трансформаторов 40

ЧЕПЕЛЮК А.А., ХЛОБЫСТИН А.Л.

О влиянии технического состояния внутридомовых распределительных
сетей на электробезопасность бытовых однофазных потребителей элек-
трической энергии 46

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

ГАЛАЙКО Л.П.

Имитационное моделирование режима рекуперативного торможения вентиль-
но-индукторного двигателя рудничного электровоза 54

ЕГОРОВ А.В., НАНИЙ В.В., ЮХИМЧУК В.Д., ПОТОЦКИЙ Д.В.,

Выбор оптимального материала для сердечника двигателя с катящимся рото-
ром, с применением численных методов 59

МИЛЫХ В.И., ШПАТЕНКО В.С., КУЗЬМИН В.В.

Причины повреждения склеенных пакетов сердечников статоров крупных тур-
богенераторов 63

МІШИН В.І., КАПЛІУН В.В., ЧУЄНКО Р.М., ГАВРІЛЮК В.В.

Властивості компенсованих асинхронних машин із суміщеними обмотками статора	67
---	----

ЦОДИК І.А., ХУДОБИН К.В., БАКАЕВ О.В.

Испытание асинхронного двигателя в многоскоростном электроприводе	74
---	----

СИЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПОЛЯ

БАТЫГИН Ю.В., ГНАТОВ А.В., ГНАТОВА Щ.В., ЧАПЛЫГИН Е.А.

Переходной процесс при разряде емкостного накопителя в магнитно-импульсной установке	79
--	----

ГОЛИК О.В., ХОРУЖИНА В.В., ТОЛОШНЯ Ю.П.

Новые материалы для силовых кабелей среднего напряжения	90
---	----

ЩЕБЕНЮК Л.А., АНТОНЕЦЬ Т.Ю., КОЧІН І.С.,

Визначення переважувальної спроможності силового кабелю, прокладеного в приміщенні	96
--	----

**ЮФЕРОВ В.Б., ЕГОРОВ А.М., ШАРЫЙ С.В., ДРУЙ О.С.,
ИЛЬИЧЕВА В.О., ШВЕЦ М.О., СВИЧКАРЬ А.С., ТКАЧЕВА Т.И.**

О некоторых особенностях сепарационных устройств с вращающейся плазмой в скрещенных электрическом и магнитном полях	102
---	-----

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ

КУЗНЕЦОВ Б.И., НИКИТИНА Т.Б., БОВДУЙ И.В., ВОЛОШКО А.В., ВИНИЧЕНКО Е.В.

Экспериментальное исследование динамических характеристик различных регуляторов скорости стенда двухмассовой электромеханической системы	116
--	-----

ПРИСТРОЇ ТА МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

БАГМЕТ О.І., ПОЗНЯКОВА М.Е.

Исследование метрологических характеристик электромагнитного диа-метромера	124
--	-----

ГУСЕЛЬНИКОВ В.К., ТВЕРИТНИКОВА О.Є., БЕЛКОВА Т.Б.

Универсальный метеорологический центр	131
---	-----

ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ

НИЖЕВСКИЙ И.В.

Исследование влияния промерзания (просыхания) верхнего слоя земли на сопротивление заземляющего устройства подстанции	135
---	-----

ABSTRACTS	141
-----------------	-----

Вимоги до оформлення статей	147
-----------------------------------	-----

Зміст	151
-------------	-----

Наукове видання

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

Збірник наукових праць

Тематичний випуск
"Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів.
Теорія і практика"

№ 60'2011

Науковий редактор д.т.н., проф. *В.С. Лупіков*
Технічні редактори: *Н.В. Себякіна, І.С. Варшамова*

Відповідальний за випуск к.т.н. *І.Б. Обухова*

Обл.-вид. № 61-11

Підп. до друку 22.12.2011 р. Формат 60×84 1/16. Папір офісний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 9. Наклад 100 прим. 1-й з-д 1-70.
Зам. № 157. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ "ХПІ".
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ "ХПІ", 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

ISSN 2079-3944. Вісник НТУ "ХПІ". 2011. № 60