ISSN 0136-3549

0134-3815



- 1

627

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

> ГИБКИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА







TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISE

труды таллинского политехнического института

УДК 62-83:621.313.12

ГИБКИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОЛСТВА

Электропривод XX11

Таллин 1986



Содержание

| I. | Тийсмус Х.А. Научные исследования кафедры электропривода ТПИ 1956-1986 гг | 3 |
|--|---|-----------------|
| 2. | Тийсмус Х.А., Лаугис Ю.Я., Тээметс Р.А. Линей- ные асинхронные двигатели. Опыт разработки, изготовления и применения | 15 |
| 3. | Лаугис Ю.Я., Оорн А.Ф. Динамические режимы ра- боты электгопривода с погружным МГД-двигателем | 27 |
| 4. | Лойгом В.В., Саккос Х.А. Развитие теоретических исследований динамики МГД-привода | 39 |
| 5. | Лойгом В.В., Саккос Х.А. Экспериментальные ис- следования динамики МГД-привода | 47 |
| 6. | Томсон Я.Я. О составлении передаточных функций САУ электроприводов | 53 |
| 7. | Роосимаа Т.Э., Лехтла Т.В. Управление техно- логическим комплексом для резки титановых заго- | |
| 8. | товок Кескюла В.Ф., Кильк А.О., Кюльм Э.Г. Исследова- | 63 |
| | поля в расточке "явнополюсного" индукционного вращателя. | 7I |
| 9. | Кескюла В.Ф., Кильк А.О., Кюлым Э.Г. Тепловой расчет "явнополюсных" индукционных вращателей | 83 |
| IO. | Ристхейн Э.М. К математической интерпретации ме- ханической характеристики асинхронного коротко- | |
| | замкнутого двигателя | IOI |
| ТАЛЛ Труды ГИБК И ИХ Элект На руб | ИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ТПИ № 627 ИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ропривод ХХП сском языке | |
| Отв. р Сборни Подпис Форма Зак. М | ред. Р. Лахтметс. Техн. ред. М. Тамме ик утвержден коллегией Трудов ТПИ 29.05.86 сано к печати 12.11.86. МВ-09614 т 60х90/16. Печ. л. 6,75 + 0,25. Учизд. л. 5,6. Тираж 400 5.510. Цена 80 код. Талинский политехникоский постати | |
| 200108 | С Таллинский политехнический институт, 15 С Таллинский политехнический институт, 16 | оскла2/! 986 |

№ 627

TAILINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Х.А. Тийсмус

научные исследования кафедры электропривода ТПИ 1956...1986 гг.

Кафедра была организована в сентябре 1956 г. Изначально ее назвали кафедрой электрификации промышленности. В составе кафедры приступили к работе 6 преподавателей: д.т.н., проф. А. Вольдек, к.т.н., доц. Э. Ристхейн, ст. преп. Е. Пуусепп, ст. преп. У. Агур, к.т.н., ст. преп. П. Каасик, к.т.н., асс. Х. Тийсмус.

Научное направление обычно выбирает руководитель, и это нелегкая задача, так как каждый член вновь созданной кафедры связан со своей плановой тематикой. Поэтому нет ничего удивительного в том, что в осеннем семестре 1956 г. не проводились работы по электрификации промышленных предприятий, а выполнялись они по теории и практике электрических машин и в направлении разработки специальных электроприводов.

Проф. А. Вольдек со своей группой продолжал работы по индуктивностям рассеяния лобовых частей обмоток индукционных машин. Ст. преп. П. Каасик завершил работу по исследованию системы воздушного охлаждения крупного синхронного двигателя, и в I957 г. переехал в Ленинград, на кафедру электрических машин ЛПИ.

"Приводческое" направление было представлено тематикой исследований ст. преп. У. Агура и асс. Х. Тийсмуса. Первый из них исследовал возможности совмещения электронной модели силовой части электропривода с реальным регулятором. Вторая тема этого направления была связана с исследованием возможности ограничения электромагнитного момента двигателя постоянного тока при помощи датчика Холла (асс. Х. Тийсмус, асс. Г. Вяльямяэ). Сигналы от этого датчика, пропорциональные электромагнитному моменту двигателя, усиленные транзисторным усилителем с ограниченным выходным сигналом позволяют получить привод с т.н. экскаваторной характеристикой, что необходимо для упрощения пуска и защиты двигателя от перегрузок.

В аспирантуре Э. Ристхейн исследовал переходные процессы асинхронных машин и работал над этой темой до 1959 г., одновременно изучая особенности и богатейшие возможности электромагнитных насосов переменного тока. Позднее он периодически возвращался к этой теме, привлекая к исследованию электромагнитных переходных процессов асинхронного двигателя А. Арусоо, Я. Лоотуса и Р. Лахтметса.

Однако выбор основного направления и становление традиции научного исследования связаны с совершенно новой областью работ, которые вел с 1954 г. доц. Э. Ристхейн. Он доказывал целесоабразность работ по созданию электромагнитных насосов, представляющих собой совмещение электрической машины с насосом для промышленных литейных установок. Проф. А. Вольдек принял рекомендацию доц. Э. Ристхейна и предложение Л. Верте по выполнению хоздоговорной работы этого (направления. Это вдохновило молодой коллектив к разработке теоретических основ магнитогидродинамических (МГД) машин. Научным руководителем нового направления стал заведующий кафедрой проф. А. Вольдек.

В 1957 г. после завершения аспирантуры в ЛЭТИ, должность ассистента кафедры электропривода занял Г. Самолевский. Он исследовал возможности использования многоступенчатых рототролов в сложных систёмах корабельного электропривода, но в 1962 году перешел на кафедру электрических машин, где продолжал заниматься своей темой. Туда же перешли ассистенты А. Кыйв и Э. Валласте, кратковременно работавшие на кафедре электропривода. Последний из них работал в области малых электрических машин, а позже занялся МГДжелобами.

В первые четыре года были созданы основы расчета МГДнасосов и разработаны основные положения индукционных двигателей с разомкнутым магнитопроводом. Эта теория получила признание научной общественности и развитие и в других научных коллективах страны.

Первая публикация этого направления относится в 1958 году и посвящена экспериментальному исследованию магнитных

4

полей в индукционных машинах и насосах для жидких металлов с разомкнутым магнитопроводом. В этих работах участвовали многие электрики ТПИ, ставшие позже известными в других научных направлениях (академик АН ЭССР Б. Тамм, доценты X. Силламаа, X. Росс, O. Тапупере, Г. Вяльямяэ, O. Терно и др.).

В 1962 году был опубликован первый сборник трудов "Исследование и проектирование индукционных насосов для транспорта жидких металлов", который положил начало традиции таких публикаций. К настоящему времени издано 22 сборника трудов этого направления, последние под названием "Автоматизированные магнитогидродинамические и линейные электроприводы и их элементы".

К 1962 г. на основе выполненных работ наши представления об особенностях МГД-машин получили достаточно четкое очертание. Были рассмотрены основные элементы теории индукционных насосов: продольный краевой эффект в первичной цепи, поперечный краевой эффект во вторичной цепи, поверхностные эффекты в жидком металле, продольный краевой эффект во вторичной цепи, реакция токов в жидком металле, индуктивные сопротивления обмоток индуктора, добавочные потери, эквивалентная схема МГД-машины, методы охлаждения индуктора, основы конструирования, оптимальные геометрические соотношения, рекомендации по выбору материалов и методика расчета индукционных насосов.

На основе изложенного можно сделать вывод, что к этому времени были заложены основы теории индукционных насосов и разработаны первоначальные методики их расчета. Теория МГДмашин завершила пионерский этап развития, в котором участвовали проф. А. Вольдек, доценты Х. Янес, Х. Тийсмус, Э. Ристхейн, Т. Веске, Э. Валласте, Е. Пуусепп, инженеры Х. Лийн, Х. Таммемяги, Х. Кээрус, М. Саар, студенты А. Конт и др.

Переход к зрелости рассматриваемого направления связан с развертыванием опытно-конструкторских работ и внедрением индукционных МГД-средств в промышленность в виде единых комплексов МГД-привода на основе четкой теории возникшего тогда научного направления.

5

Дон. Э. Ристхейн разработал до этого методику теплового расчета плоских индукционных насосов, вошедшую позже в общий формуляр контрольного расчета плоского индукционного насоса, первую редакцию которого составили Х. Янес, Х. Таммемяги и А. Конт на основе разработанных А. Вольдеком теоретических положений.

Примерно в эти годы стало ясно, что внедрение полученных результатов неизменно выдвигает задачи питания, контроля и управления МГД-машинами, характерные для любого вида электропривода. Поэтому было решено машинные аспекты этого направления поручить кафедре электрических машин (доц. X. Янес), а приводческие – кафедре электрификации промышленности (доц. X. Тийсмус).

Необходимость разработки вопросов МГД-привода была выдвинута требованиями практики уже в пионерский этап развития. Первую работу этого направления, посвященную релейно-контакторному управлению работой индукционного насоса, выполнили Х. Тийсмус и А. Конт. Право научного руководства аспирантам имел проф. А. Вольдек, как доктор наук. Как исключение, такое право было предоставлено доцентам Х. Силламаа, Х. Янесу, П. Плакку, Г. Самолевскому, а затем Х. Тийсмусу и значительно позже – Ю. Лаугису, А. Конту и Я. Ярвику.

В 1962 году после завершения аспирантуры в ЛЭТИ должность ассистента кафедры электропривода занял Я. Томсон. Он продолжал исследование магнитоупругого датчика момента в целях завершения диссертации. Однако эта тематика не получила широкого развития, как и все другие, начатые вне ТПИ аспирантские темы.

Избрание проф. А. Вольдека заведующим кафедрой электрических машин Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина и его уход в 1961 году ослабили научный потенциал исследовательской группы, но работы начатого направления продолжались. Связь с ним не прервалась тем более, что была надежда на его возвращение в Таллин.

В этот период был выполнен ряд крупных хоздоговорных работ по развитию МГД-машин и приводов.

В 1963-1964 гг. на кафедру пришли свои выпускники В. Лойгом, Ю. Лаугис и Я. Лоотус. Тематика их научной работы была связана с новым направлением исследований кафедры - теорией и практикой магнитогидродинамического (МГД) электропривода. Она оказалась плодотворной, т.к. все защитившие диссертации преподаватели кафедры остались верными этой тематике. Ниже назовем темы диссертаций всех защитивших преподавателей и сотрудников кафедр, чтобы убедиться в истинности этого утверждения.

I. Ю. Лаугис. Исследование системы автоматического регулирования магнитогидродинамического привода. ЛЭТИ, 1970.

2. Я. Лоотус. Исследование режимов противовключения магнитогидродинамического привода. ЛПИ, 1971.

 Р. Ирс. Исследование частотно-управляемого линейного индукционного магнитогидродинамического привода. ЛЭТИ, 1974.

4. В. Лойгом. Разработка и исследование металлургического линейного магнитогидродинамического привода. ЛЭТИ, 1975.

5. Т. Лехтла. Исследование магнитогидродинамического (МГД) привода в дозаторном режиме. ОПИ, 1976.

6. Х. Саккос. Исследование установившихся и динамических режимов работы автоматизированного магнитогидродинамического привода. БПИ, 1977.

7. Р. Тээметс. Разработка и исследование двухцелевого линейного электропривода. ВНИИЭП. 1980.

8. А. Оорн. Разработка силовой части электропривода с погружным МГД-двигателем для литейного производства. МЭИ, 1984.

9. Э. Петтай. Разработка силовой части двухдвигательного МГД-привода для автоматизации заливки литейных форм. МЭИ, 1985.

Двое сотрудников кафедры защитили докторские диссертации.

IO. А. Вольдек. Исследование индуктивностей рассеяния магнитных полей в лобовых частях индукционных машин. ЛПИ, 1956.

II. Х. Тийсмус. Автоматизированный линейный магнитогидродинамический (МГД) электропривод (теория, разработка и внедрение) (ЛЭТИ), 1977. Даже этот перечень позволяет сделать вывод, что усилия кафедры фокусировались четко на разработку линейного и МГДпривода, уже нашедших применение в теплообменных системах атомной энергетики, металлургии и литейном производстве. В недалеком будущем они найдут достойное место в литейных гибких производственных системах, где необходимо герметично перемещать различные токопроводящие жидкости, в том числе в литейных роботах нового поколения.

В 1960...1964 гг. были проведены крупномасштабные лабораторные испытания полупромышленных образцов МГД-привода для перекачивания жидкого алюминия и магния.

Магниевая установка, разработанная совместно с Всесоюзным алюминиево-магниевым институтом (ВАМИ, Ленинград) испытывалась в лаборатории ТПИ (ул. Калинина, 82) двумя этапами в течение IO суток в режиме непрерывной работы, а затем с перемежающимися остановками и пусками. Результаты этого испытания позволили в 1966 году освоить и внедрить МГД-привод для подачи жидкого магния из печи непрерывного рафинирования в изложницы литейного конвейера на Усть-Каменогорском титано-магниевом комбинате. Это позволило использовать накопленный опыт на Калушском химико-металлургическом KOMбинате при автоматизации процесса разливки магния. Заверше-НИЕ ПЕрвого этапа внедрения результатов научно-исследовательских работ было оценено государственной премией Советской Эстонии в 1967 году, когда лауреатами стали проф. А. Вольдек и доценты Х. Янес, Х. Тийсмус и Э. Ристхейн. К этому времени расширились научные связи со многими ведомствами, организациями и вузами страны в Москве, Ленинграде, Киеве. Риге, Алма-Ате и почти со всеми кафедрами электропривода 60 BY30B.

В 1965 году, на Таллинской сессии научно-исследовательской комиссии Минвуза СССР по специальности 0628 "Электропривод и автоматизация промышленных установок", доц. Х. Тийсмус был введен в состав этой комиссии, где работает по настоящее время.

Интенсивная научная работа содействовала укреплению учебного процесса, развитию его методики и обеспечению учебной литературой. Так, в 1961 году было издано первое учебное пособие на эстонском языке: Х. Янес, П. Каасик, Е. Пуусепп,

8

А. Вольдек. Электрические машины. ЭГИ. 1961, а в 1963 году - книга У. Агур, Х. Тийсмус. Электроприводы. ЭГИ. 1963, содержащая курсы теории и управления приводами.

В 1965 году кафедра получила название "Электропривод и автоматизация промышленных установок" в связи с модернизацией содержачия специальности и внедрением нового учебного плана.

| Заведующими кафед | рами работали: | |
|-------------------|-----------------------|--------|
| проф. А. Вольдек | - 19561961, | |
| доц. Х. Тийсмус | - 19611970, | |
| доц. Э. Ристхейн | - 19701975, | |
| дон. Ю. Лаугис | - 19751980, | |
| проф. Х. Тийсмус | - 1980 по настоящее : | время. |

Каждому из указанных здесь этапов развития свойственны характерные устремления и задачи.

Первый этап развития кафедры характеризуется бесусловно заботой о кадрах, организанией учебной и научно-исследовательской деятельности коллектива. В шестидесятые-семидесятые годы прибавилась задача "выхода в свет", т.е. налаживание научных связей с вузами, проектными и исследовательскими организациями и заводами страны.

В семидесятые-восьмидесятые годы прибавились четкая организация методики, отчетности и налаживание связей с заграничными вузами, т.е. "выход за границу". Это вызвало немедленную обратную реакцию – неотложную потребность модернизации лабораторной базы, приближение ее к современным требованиям.

Уже к шестидесятым годам научный задел кафедры позволил поднять вопрос об организации проблемной научно-исследовательской лаборатории, что и было сделано. Однако потребовался организационный пыл и опыт заграничной стажировки доц. Ю. Лаугиса, чтобы довести эту идею до практической реализации в 1980 г., когда была создана отраслевая научноисследовательская лаборатория "Электропривод и автоматизированные системы управления технологическими процессами" совместным приказом министров авиационной промышленности СССР и высшего и среднего специального образования Эстонской ССР.

9

Научные связи налажены со многими иностранными вузами - Карл-Маркс-Штадтским высшим техническим училищем (ГДР), Будапештским высшим техническим училищем (ВНР), техническими университетами в Хельсинки и Тампере (Финляндская Республика) и др.

Сотрудничество с КВТУ развивается по плану совместно выполняемых научных исследований около IO лет. Это позволило организовать обмен студентами и повышение квалификации преподавателей с использованием материальной базы и научного потенциала обоих вузов.

На кафедре в разное врємя работали преподавателями ассистенты Т. Шадейко, Э. Сеппинг, Х. Карро, ст. преп. К. Кыннусаар, Я. Ярвик и в порядке штатного совместительства — М. Тарма, К. Вейсс и И. Прессманн. Научные интересы доп. Я. Ярвика связаны с исследованием мощных статических компенсаторов коэффициента мощности. Однако в связи с переходом Л. Ярвика эта тематика передана кафедре основ электротехники.

Уровень обслуживания материальной базы кафедры и забота об ее развитии составляют эсновное оодержание работы учебно-вспомогательного персонала кафедры. Заведующими лабораториями кафедры работали со времени организации Х. Нагел, К. Шильф, Т. Ояла, В. Хансберг, Х. Варблане, Э. Лайкмаа, А. Сынаялг, У. Мурд. Из них наилучших результатов добился К. Шильф, который возглавляет сейчас объединение "Харью Электер" в системе межколхозного строительства.

Результаты научных исследований в области МГД и линейного электропривода получили известность и признание в той степени, что позволили ввести их определения в ГОСТ I6593--71 и ГОСТ I6593-79.

Эти результаты нашли путь в практику в виде прямых внедрений во многих технологических процессах, а также в виде выданных сотрудникам кафедры и отраслевой лаборатории 57 авторских свидетельств, позволивших выдвинуть доц. Ю. Лаугиса в 1985 году на присвоение почетного звания "Заслуженный изобретатель ЭССР". Звание заслуженного деятеля науки присвоено проф. Х. Тийсмусу в 1980 году.

Научные результаты исследований по МГД-технике отражены в 176 статьях и 22 сборниках трудов ТПИ и обобщены в монографии Х. Тийсмуса, Ю. Лаугиса "Автоматизированный МГДпривод", Л., Энергия, 1980, а также в сборниках многих всесоюзных конференций и опубликованных за границей статьях.

Все это позволило организовать в 1975 году в Таллине УП Всесоюзную конференцию по автоматизированному электроприводу, а в 1981 году провести всесоюзный симпозиум "Автоматизированный линейный и магнитогидродинамический электропривод", а силами кафедоы и отраслевой лаборатории организовать в сентябре 1984 г. в Москве на ВДНХ школу-семинар "Применение магнитогидродинамических (МГД) и линейных электроприводов в системах гибкого автоматизированного литейного производства".

Кафедра работает с перспективой использования результатов своих исследований в литейных работах нового поколения и гибких автоматизированных системах литейного производства (ГАЛП).

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что кафедра достигла уровня зрелого научного коллектива, приобрела за 30 лет развития свое лицо, свой почерк и школу и способна решать стоящие перед ней серьезные научные и прикладные задачи

Литература

I. Кафедра электропривода. TПИ, 1980.

2. Вольдек А.И., Вяльямяэ Г.Х., Силламаа Х.В., Тийсмус Х.А. Экспериментальное исследование магнитных полей в индукционных машинах и насосах для жидких металлов с разомкнутым магнитопроводом.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Серия А, 1958, № 131.

3. Тийсмус Х.А. Ограничение момента электропривода при помощи нелинейного моста.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1957, № 99.

4. Вяльямяэ Г.Х., Тийсмус Х.А. Ограничение электромагнитного момента электропривода с применением датчика эдс Холла.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1958, № 150.

5. В о л ь д е к А.И. Токи и усилия в слое жидкого металла плоских индукционных насосов. ИВУЗ, Электромеханика, 1959, № 1.

II

6. Исследование и проектирование индукционных насосов для транспорта жидких металлов. Сборник I.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Серия А, 1962, № 197.

7. Исследование и проектирование индукционных насосов для транспорта жидких металлов. Сборник П.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Серия А, 1964, № 214.

8. Исследование и проектирование электромагнитных средсть перемещения жидких металлов. Сборник Ш.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Серия А, 1965, № 231.

9. То же. Сборник IУ.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Серия А, I966, № 239

10. То же. Сборник У.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Серия А, 1967, № 249.

II. То же. Сборник УІ.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та, Серия А, 1968, № 266.

I2. То же. Сборник УП.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Серия А, 1970, № 284.

I3. То же. Сборник УПІ.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Серия А, 1970, № 301.

I4. То же. Сборник IX.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Серия А, I97I, № 3I5.

I5. То же. Сборник Х.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1973, № 336.

16. То же. Сборник XI.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1974, № 363.

17. То же. Сборник ХП.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1975, № 382.

18. То же. Сборник ХШ.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1976, № 398.

19. То же. Сборник XIУ.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1977, № 425.

20. То же. Сборник ХУ.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1978, № 456.

21. То же. Сборник XУІ.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1979, № 476.

12

22. Расчет электромагнитных и тепловых режимов магнитогидродинамических и линейных электродвигателей. Сборник ХУП. Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1980, № 500.

23. Автоматизированные магнитогидродинамические и линейные слектроприводы и их элементы. Сборник ХУШ.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1981, № 520.

24. То же. Сборник XIX.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1982, № 539.

25. То же. Сборник XX.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1983, № 559.

26. То же. Сборник XXI.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1984, № 589.

27. Гибкие автоматизированные производственные системы и их элементы для литейного производства.Сборник XXII. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1986, № 627.

28. Тийсмус Х.А., Лаугис Ю.Я. Автоматизированный МГД-привод. М., Энергия. 1980.

29. Автоматизированный линейный и магнитогидродинамический электропривод. Тезисы докладов симпозиума. Таллин, 1981.

30. Применение магнитогидродинамических (МГД) и линейных электроприводов в системах гибкого автоматизированного литейного производства. Тезисы докладов школы-семинара. М., ВДНХ, 1984.

H. Tiismus

Research Work at the Department of Electrical Drive of Tallinn Technical University

Abstract

Main stages of research advancement, researchers and brief comments are given in the paper on the occasion of the 30th anniversary of the departmental activities. A research team is consolidated through consistent pursuit of research activities. This fact is illustrated by the example of the Department of Electrical Drives of Tallinn Technical University which has acquired specific features and visage in the field of magnetohydrodynamic electrical drives.



№ 627

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 521.313.333-12

Х.А. Тийсмус, Ю.Я. Лаугис, Р.А. Тээметс

ЛИНЕЙНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ. ОПЫТ РАЗРАБОТКИ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ

Линейные асинхронные двигатели (ЛАД) представляют в последние десятилетия сэрьезный интерес среди специалистов различных отраслей народного хозяйства. Такое внимание они заслужили благодаря особенностям своей конструкции и работы, а также развивающим системам управления на базе современной микроэлектроники.

Принцип работы ЛАД ничем не отличается от принципа работы магнитогидродинамических (МГД) насосов (двигателей) переменного тока с бегущим магнитным полем. Разница заключается только в том, что вместо вторичной системы (ВС) в виде жидкого горячего металла ЛАД имеет ВС из твердого металла с хорошей электропроводностью. Рабочая температура ВС обычно не превышает IOO ^оС.

Исходя из этого, можно сказать, что разработка линейных индукторов с бегущим магнитным полем переменного тока в Таллинском политехническом институте (ТПИ) началась в 1960-е годы, когда были спроектированы и изготовлены плоские МГД-насосы типа ЭМН-7 (рис. I) [I] и цилиндрические МГД-насосы типа ЦИНС (рис. 2).

Приведенные МГД-насссы были успешно внедрены в ряде промышленных предприятий страны для перекачивания жидкого магния. В ходе исследований были разработаны основы электромагнитного и теплового расчетов этих двигателей, а также технология их изготовления.

В середине 70-х годов на кафедре электропривода ТШИ началась научно-исследовательская работа по линейному электроприводу на базе ЛАД.



Рис. 1. Общий вид плоского МГД-насоса ЭМН-7: 1 - основание, 2 - кожух, 3 - клеммная коробка.



Рис. 2. Общий вид цилиндрического МГД-насоса ЦИНС-8: 1 – основание, 2 – клеммная коробка, 3 – кожух.

Первым практическим результатом исследований нового направления являлась разработка и изготовление плоского ЛАД типа ПЛАД I3/7515-I5 (односторонний, трехфазный, с размерами магнитной системы 750хI50 мм, с синхронной скоростью I5 м/с) (рис. 3) на основе МГД-насоса ЭМН-7. Двигатель представляет собой плоский односторонний линейный индуктор с трехфазной обмоткой бегущего магнитного поля, смонтированный в защитный кожух. Кожух снабжен вентиляционными отверстиями, дистанционными роликами и клеммной коробкой. Для крепления ЛАД к рабочему механизму он снабжен специальным основанием.

Особенностями данного линейного двигателя являются большое тяговое усилие (до IOOO H) и высокая синхронная скорость первичного поля (I4,7 м/с ≈ 53 км/ч). По этим



Рис. 3. Общий вид плоского линейного асинхронного двигателя ПЛАД 13/7515-15:

1 - индуктор, 2 - защитная панель, 3 - кожух, 4 - клеммная коробка, 5 - основание.



Рис. 4. Литейная карусельная машина с двухцелевым линейным электроприводом.

показателям его можно рекомендовать для применения в тяговых транспортных системах.

Линейные двигатели типа ПЛАД I3/75I5-I5 были успешно внедрены в составе литейной карусельной машины ЛКМ-3,8 в качестве силового и нагревательного органа двухцелевого линейного электропривода (рис. 4).

Технические данные ПЛАД 13/7515-15 следующие [2]:

| - | номинальное напряжение | 380 B, |
|---|--|----------|
| - | число фаз | З, |
| - | номинальная частота | 50 Гц, |
| - | номинальный ток (при s = 1) | 3I A, |
| - | номинальная мощность (при s = I) | ІО кВт, |
| - | коэффициент мощности (при s = I) | 0,56, |
| - | пусковое усилие | 500 H, |
| - | синхронная скорость | I5 м/с, |
| - | немагнитный зазор | 5 мм, |
| - | вторичная система - алюминиевая полоса | толщиной |
| | 2 мм и шириной 200 | MM, |
| - | охлаждение воздушное, естеств | енное |
| - | габаритные размеры 0,89 х 0,46 х 0,15 | Μ, |
| - | Macca | I40 кг. |
| | | |

Следующим линейным двигателем, разработанным и изготовленным в ТПИ, является плоский ЛАД типа ПЛАД I3/37II-6 (односторонний, трехфазный, с размерами магнитной системы 370 x IIO мм, с синхронной скоростью 6 м/с), приведенный на рис. 5. Двигатель имеет несколько иную конструкцию, чем предыдущий, но это обусловлено его применением и необходимостью сочетания двигателя с приводимым механизмом [3]. Этому двигателю характерны небольшое тяговое усилие (IIO H) и невысокая синхронная скорость магнитного поля (6 м/с), поэтому его можно рекомендовать для применения в системах перемещения предметов или в механизмах возвратно-поступательного движения.

Двигатель ПЛАД I3/37II-6 нашел широкое промышленное внедрение на манипуляторах для рентгеноконтроля, разработанных также на кафедре электропривода ТПИ (рис. 6). Применение ЛАД в качестве приводного двигателя позволяет получить вращательное движение планшайбы манипулятора без каких-либо механических передаточных устройств [4].



Рис. 5. Общий вид плоского линейного асинхронного двигателя ПЛАД 13/3711-6: 1 - индуктор; 2 - кожух; 3 - основание.



Рис. 6. Общий вид манипулятора для рентгеноконтроля серии МР: 1 - планшайба; 2 - линейный асинхронный двигатель; 3 - основание.

| Технические данные ПЛАД I3/37II-6 следующи | ие: |
|--|------------|
| - номинальное напряжение | 380 B, |
| - число фаз | З, |
| - номинальная частота | 50 Гц, |
| - номинальный ток (при s = I) | 3 A, |
| - номинальная мощность (при s = I) | 0,95 кВт, |
| - коэффициент мощности (при s = I) | 0,47, |
| - пусковое усилие | IIO H, |
| - синхронная скорость | 6 m/c, |
| - немагнитный зазор | 2,5 мм, |
| - вторичная система алюминиевая полоса | а толщиной |
| I,5 мм и шириной . | I40 MM, |
| - охлаждение обмоток воздушное, естести | венное |
| - габаритные размеры 0,46 х 0,2 х 0,2 г | м, |
| - Macca | 33,5 кг. |
| | |

Линейный двигатель типа ЦЛАД 03/2205-5 (трехфазный, длина магнитной цепи 220 мм, внутренний диаметр индуктора 50 мм, синхронная скорость 5 м/с) является первым представителем семейства цилиндрических ЛАД (рис. 7). Двигатель состоит из цилиндрического линейного индуктора с трехфазной обмоткой бегущего поля, защитного кожуха, основания и клеммной коробки.

Двигателю характерны среднее тяговое усилие (400 H) и невысокая синхронная скорость (5 м/с). Он может быть применен в качестве приводного двигателя в механизмах перемещения груза, позиционирования деталей, открытия-закрытия дверей, штамповки и т.д.

На кафедре электропривода ППИ данный линейный двигатель был разработан и изготовлен в целях исследования возможностей его применения в качестве приводного двигателя руки манипулятора.

| Технические | данные | ЦЛАЛ | 03, | 2205-5 | слелующие | [5]: |
|-------------|--------|------|-----|--------|-----------|------|
|-------------|--------|------|-----|--------|-----------|------|

| - | номинальное | напряжение | 380 B, |
|---|--------------|----------------------|----------|
| - | число фаз | | 3. |
| - | номинальная | частота | 50 Гц, |
| - | номинальный | ток (при S = I) | I5 A, |
| - | номинальная | мощность (при s = I) | I,5 кВт, |
| - | коэффициент | мощности (при s = I) | 0,53, |
| - | пусковое уси | ллие | 400 H, |



| - синхронная скорость | D M/C, |
|---|-------------------------------------|
| - немагнитный зазор | З мм, |
| - вторичная система алюминиевая стенки 2 мм, ную трубу, | труба толщиной надетая на сталь- |
| - охлаждение воздушное, е | стественное, |
| - габаритные размеры 0,394 х 0,20 | 2T KD |

На основании результатов исследования ЦЛАД 03/2205-5 был разработан и изготовлен мощный промышленный вариант цилиндрического ЛАД типа ЦЛАД 03/6005-7 (трехфазный, длина магнитной цепи 600 мм, внутренний диаметр индуктора 50 мм, синхронная скорость 7 м/с). Двигатель отличается строгим внешним видом, высокими техническими показателями и удобством и простотой в обслуживании, обусловленном удачным техническим решением конструкции (рис. 8).

Данному ЛАД характерны большое тяговое усилие (800 H) и невысокая синхронная скорость (7 м/с), поэтому его следует рекомендовать для применения в устройствах перемещения тяжелого груза и в системах подачи.

ЦЛАД 03/6005-7 внедрен на одном предприятии страны в качестве двигателя подачи на манипуляторе для резки титановых заготовок, где он отличается эффективностью работы.

| Технические | данные Ш | АД 04/6005-7 | следующие [6]: |
|----------------|-----------|--------------|-------------------|
| - номинальное | напряжени | ie | 380 B, |
| - число фаз | | | З, |
| - номинальная | частота | | 50 Гц, |
| - номинальный | ток (при | s = I) | I8 A, |
| - номинальная | мощность | (при s = I) | 7,5 кВт, |
| - коэффициент | мощности | (при s = I) | 0,62, |
| - пусковое усл | илие | | 800 H, |
| - синхронная о | скорость | | 7 M/c, |
| - немагнитный | зазор | | З мм, |
| - вторичная с | истема | медная труба | а толщиной стенки |
| | | 2 мм, надета | ая на стальную, |
| - охлаждение | | воздушное, е | естественное, |
| - габаритные ј | размеры | 0,84 x 0,215 | 5 х 0,18 м, |
| - Macca | | | 50 кг. |



Рис. 9. Общий вид цилиндрического линейного асинхронного двигателя ЦЛАД 03/602,5-3:

1 - вторичная система; 2 - индуктор.



Рис. 10. Плоский линейный асинхронный двигатель, залитый в эпоксидную смолу.

Все вышеприведенные типы ЛАД, разработанные в ТПИ, были в 1984 году экспонированы на выставке "Промышленные роботы и робототехнические комплексы" в павильоне "Машиностроение" ВДНХ СССР. За разработку и внедрение этих линейных двигателей сотрудникам ТПИ выдали две серебряных и шесть бронзовых медалей ВДНХ СССР.

На кафедре основ электротехники ТПИ разработаны цилиндрические линейные асинхронные двигатели ЦЛАД 03/602,5-3 и ЦЛАД 03/1202,5-3 (рис. 9) [7, 8]. Эти двигатели отличаются новым внешним видом и технологией изготовления.Конструкция разработана на основании модульного принципа.Магнитопровод ЦЛАД собирают из отдельных одинаковых модулей, изготовленных из металлокерамики. Такой принцип позволяет существенно сэкономить время и материалы на изготовление магнитопровода, а также упростить сборк, двигателя.

Новым направлением изготовления плоских линейных двигателей является их заливка в эпоксидную смолу, что позволяет получить герметичную конструкцию двигателя, исключая необходимость снабжения двигателя металлическим защитным кожухом (рис. IO). Двигатели этой конструкции в первую очередь предназначены для работы в условиях повышенной влажности окружающей среды.

В мировом масштабе характерно упрощение монструкции ЛАД, применение в них новых современных эффективных материалов и технологии изготовления, совершенствование систем управления (СУ) введением микропроцессорной техники, а также тенденция к созданию т.н. модульных линейных приводов, включающих в одном устройстве ЛАД и СУ. Благодаря этому области применения линейных асинхронных двигателей постоянно расширяются.

Литература

I. Магнитогидродинамический (МГД-) насос для жидкого магния ЭМН-7 м. Рекламный проспект / Составители Х.А. Тийсмус, Х.И. Янес, Э.М. Ристхейн. - Таллин, 1969. 4 с.

2. Линейный асинхронный двигатель ПЛАД I3/7515-I5. Рекламный лист / Составитель Р.А. Тээметс. - Таллин, 1976.

3. Линейный асинхронный двигатель ПЛАД I3/37II-6. Рекламный лист / Составитель Р.А. Тээметс. Таллин, 1983. 4. Манипулятор для рентгеноконтроля МР-1600ДМЗ. Рекламный лист / Составитель А.Х. Рейвик. - Таллин, 1983.

5. Линейный асинхронный двигатель ЦЛАД 03/2205-5. Рекламный лист /Составитель Р.А. Тээметс. - Таллин, 1983.

6. Линейный асинхронный двигатель ЦЛАД 03/6005-7. Рекламный лист / Составитель Р.А. Тээметс. - Таллин, 1983.

7. Цилиндрический линейный двигатель ЦЛАД 03/602,5-3. Рекламный лист / Составитель В.А. Сиймар. - Таллин, 1984.

8. Цилиндрический линейный двигатель ЦЛАД 03/1202,5-3. Рекламный лист / Составитель В.А. Сиймар. - Таллин, 1984.

H. Tiismus, J. Laugis, R. Teemets

Wanderfeldlinearmotoren: Entwurfs-, Herstellungsund Anwendungserfahrungen

Zusammenfassung

Es werden die Konstruktionsbeschreibung, Hauptdaten und zweckmässige Anwendungsgebiete der flachen und zylinderförmigen Wanderfeldlinearmotoren, die an der technischen Hochschule Tallinn entworfen und hergestellt sind, vorgelegt.



№ 627

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.746.22.06-83:621.313.333

Ю.Я. Лаугис, А.Ф. Оорн

ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. С ПОГРУЖНЫМ МГД-ДВИГАТЕЛЕМ

Конструкция МГД-привода упрощается в случае применения в компановке погружного в жидкий металл МГД-двигателя, так как отпадает необходимость применения специальных пусковых устройств. При таком варианте часть канала постоянно заполнена расплавленным металлом и пуск двигателя может осуществляться включением индуктора.

За основу исследования переходных режимов электропривода с погружным МГД-двигателем принято общее уравнение движения металла в МГД-приводе [1], которое без учета электромагнитных переходных процессов является условием равновесия мгновенных давлений, действующих на жидкий металл в канале МГД-двигателя:

$$P_{\rm PM} = P_{\rm 2C} + P_{\rm 2T} + P_{\rm 0}, \qquad (I)$$

где

р_{эм} - электромагнитное давление МГД-двигателя; Р₂₀ - гидростатическое давление, обусловленное массой

столба жидкости;

- р_{2т} давление гидравлических потерь, обусловленное трением между жидкостью и стенками;
- ро динамическое давление, определяемое в результате изменения кинетической энергии движущейся массы.

Для исследования дозатора с погружным МГД-двигателем принимаем за основу модель, показанную на рис. I. Система координат для вывода уравнений движения представлена на рис. 2.

Гидростатическое давление р_{2с}, обусловленное массой столба жидкого металла пропорционально разности уровней в расходном и приемном резервуарах. Уровень металла в расходном резервуаре понижается в процессе дозирования. Изменение гид-



Рис. 1. Расчетная модель МГД-привода с погружным МГД-двигателем:

1 - плавильный агрегат; 2 - МГД-двигатель;

3 - металлопровод; 4 - литейная форма.

ростатического давления от понижения уровня металла можно учитывать, если представить в следующем виде:

$$p_{zc} = p'_{zc} + \frac{S}{S_{p}} \rho g t \dot{x}, \qquad (2)$$

где S_p - площадь свободной поверхности металла в расходном резервуаре;

t - время;

p

р'₂с - в зависимости от изменения координаты движения применяют следующие значения:

$$r_{2c} = x \rho q \sin \alpha$$
 $r_{2c} = x \rho q \sin \alpha$ (3)

$$\rho_{2c} = l_{3} \rho g \sin \alpha + \frac{(x - l_{1}) \sin \beta}{\sin \beta} \rho g \quad \text{mpm} \quad l_{3} < x \le l_{4} .$$
 (4)

Второе слагаемое выражения (2) показывает изменение гидростатического давления при понижении уровня металла в расходной емкости.

Давление гидравлических потерь P_{2T} принимается пропорциональным квадрату скорости движения металла и коэффициенту гидравлических потерь $k_{2T}(x)$ [I]. Коэффициент гидравлических потерь $k_{2T}(x)$ в процессе дозирования является суммой гидравлических потерь отдельных участков металлопровода

$$k_{2T}(x) = \sum_{i=1}^{n} k_{2T_i}(x) = \sum_{j=1}^{n} \frac{\lambda_i l_j}{D_{2j} S_j^2} + \sum_{m=1}^{n} \frac{\xi_m}{S_m^2},$$
(5)

где λ_j - коэффициент сопротивления трения j-го участка; l_i - длина j-го участка;

- D₂; гидравлический диаметр ј-го участка;
- Sj, Sm площади поперечных сечений соответствующих участков;
 - ξ_m коэффициент местного гидравлического сопротивления m-го участка.

Коэффициенты сопротивления трения определяются исходя из числа Рейнольдса

$$Re = \frac{V D_2}{V}, \qquad (6)$$

где у - кинематическая вязкость жидкого металла и относительной шероховатости металлопровода.

Коэффициенты местных сопротивлений определяются при помощи формулы [2]

$$\xi = \frac{A}{Re} + \xi_{\kappa}, \qquad (7)$$

- где A коэффициент, зависящий от вида местного сопротивления;
 - ξ_к коэффициент местного сопротивления в автомодельной области турбулентного течения.

В области Re>Re_{крит} величины коэффициентов сопротивления металлопровода мало зависят от скорости и поэтому можно принимать

$$k_{2T}(x) \neq f(x)$$
.



Рис. 2. Система координат для вывода уравнения движения.

По расчетной модели (рис. 2)металлопровод можно разделить на следующие участки:

- I вход в металлопровод;
- 2 вход в канал МГД-двигателя;
 - 3 канал МГД-двигателя;
- 4 выход из канала МГД-двигателя;
 - 5 поворот потока на угол $(\alpha \chi);$
 - 6 труба круглого сечения;
 - 7 поворот на (90° α);
 - 8 выход из металлопровода.

На основе частных зависимостей для участков можно вывести зависимость коэффициента гидравлических потерь k_{2T}(×) от координаты движения ×:

$$\begin{cases} k_{2T1} + k_{2T2} + k_{2T3}(x) & \text{при } 0 \le x < l_{1}; \\ \sum_{i=1}^{5} k_{2T_{i}} & \text{при } l_{1} \le x < l_{3}; \\ \sum_{i=1}^{6} k_{2T_{i}} + k_{2T_{6}}(x) & \text{при } l_{3} \le x < l_{4}; \\ \sum_{i=1}^{8} k_{2T_{i}} & \text{при } x = l_{4}; \\ k_{2T_{i}} = \frac{\lambda \rho l_{i}}{4S_{i}^{2} \sqrt{\frac{S_{i}}{\pi}}} + \frac{\lambda \rho x}{4S_{i}^{2} \sqrt{\frac{S_{i}}{\pi}}} \end{cases}$$
(8)

где

Так как поперечное сечение металлопровода не является постоянной величиной, то в зависимости от координаты движения подача Q выражается следующим образом:

| H alexister | SKX | при | $0 \leq x < l_1;$ | |
|-------------|---------------|-----|----------------------|-----|
| Q(x) = | Sтрх | при | $l_1 \leq x < l_3;$ | (9) |
| en seriet | STP X sing | при | $l_3 \leq X < l_4$, | |

где S_к - сечение канала МГД-двигателя;

S_{то} - сечение трубы металлопровода.

Давление гидравлических потерь на основе формул (I), (8) и (9) равняется

$$p_{2T} = k_{2T}(x) Q'(x) \sin g Q(x)$$
. (10)

Динамическое давление может быть определено через динамическую мощность ускорения массы [3]:

$$p_{\vartheta} = \frac{dA_{\kappa}}{dt} = \frac{Qm(x)}{S^2} \frac{dQ}{dt} + \frac{Q^2}{2S} \frac{dm(x)}{dx} \frac{dt}{dt}, \quad (II)$$

откуда с учетом dx/dt = Q/S

$$p_{0} = \frac{m(x)}{S^{2}}Q + \frac{Q^{2}}{S^{3}}\frac{dm(x)}{dx}$$
 (12)

Приведенная масса m(x) [3], согласно модели (рис. 2), имеет вид:

$$m(x) = \rho \left[S_{\kappa} (l_2 - l_1 - l_0) + S_{\kappa} x_1 + S_{\tau p} x_2 (\frac{S_{\kappa}}{S_{\tau p}})^2 \right], \quad (I3)$$

где

Тогда динамическое давление с учетом выражений (9) и (I0) определяется:

$$\frac{m(x)}{S_{\kappa}}\ddot{x} + \rho \dot{x}^{2} \qquad \text{при} \quad 0 \le x < l_{1};$$

$$\frac{m(x)}{S_{\kappa}^{2}}S_{\tau p}\ddot{x} + \frac{\rho S_{\kappa}}{S_{\tau p}}\dot{x}^{2} \qquad \text{при} \quad l_{1} \le x < l_{3}; \qquad (16)$$

$$\frac{m(x)}{S_{\kappa}^{2} \sin \beta}S_{\tau p}\ddot{x} + \frac{\rho S_{\kappa}}{S_{\tau p} \sin \beta}\dot{x}^{2} \qquad \text{при} \quad l_{3} \le x \le l_{4}.$$

В процессе дозирования электромагнитное давление МГДдвигателя при × > l, рассчитывается по формуле [4]:

$$\rho_{\text{PM}} = \frac{2p_{\text{M}}(1+q_{\text{P}})}{\frac{5\kappa_{\text{P}}}{5} + \frac{5}{5\kappa_{\text{P}}} + 2q_{\text{P}}},$$
 (17)

где р_м - максимальное значение электромагнитного давления; о_{кр} - критическое скольжение.

Когда × < l₁, то по методике [5] получаем пусковое электромагнитное давление:

$$P_{9MR} = F_{9M} \frac{k_i(l_2 - l_0) - l_2}{\pi r^2(l_2 - l_0)} ,$$

где

HATORGOTHEGEN SER

$$F_{9n} = \frac{2m_1^2 \epsilon_1 \mu_0 r w_n^2 q^2 k_{o\delta}}{a_w^2 \delta' \tau (1 + \epsilon_1^2)(1 + \omega)} I_1^2 l;$$

$$K_i = \frac{l_2 - l_0 + 1}{l_2 - l_1}.$$

Подставив в формулу (I) выражения (2), (8), (9), (I3), (I6), (I7) и (I8), получим систему уравнений, описывающую движение жидкого металла в электроприводе с погружным МГДдвигателем в режиме дозирования:

$$\begin{aligned} & x \rho g \sin \alpha + \frac{S_{\kappa}}{S_{p}} \rho g t \dot{x} + k_{\tau\tau}(x) S_{\kappa}^{2} \dot{x}^{2} \operatorname{sign} \dot{x} + \frac{m(x)}{S_{\kappa}} \ddot{x} + \\ & + \rho \dot{x}^{2} - \rho_{\Im M_{\Pi}} = 0 & \operatorname{mpn} \quad 0 \leq x < l_{1}; \end{aligned} \tag{19} \\ & x \rho g \sin \alpha + \frac{S_{\kappa}}{S_{p}} \rho g t \dot{x} + k_{2\tau}(x) S_{\tau p}^{2} \dot{x}^{2} \operatorname{sign} \dot{x} + \frac{m(x)}{S_{\kappa}} S_{\tau p} \ddot{x} + \\ & + \frac{\rho S_{\kappa}}{S_{\tau p}} x^{2} - \rho_{\Im M} = 0 & \operatorname{mpn} \quad l_{1} \leq x < l_{3}; \end{aligned}$$

$$\begin{split} & L_{3}\rho g \sin \alpha + \frac{(x-l_{3})\sin \gamma}{\sin \beta}\rho g + \frac{S_{\tau p}}{S_{p} \sin \beta}\rho g t \dot{x} + k_{2}(x) \frac{S_{\tau p}^{2}}{\sin^{2}\beta} \dot{x}^{2} \sin \dot{x} + \\ & + \frac{m(x)}{S_{\kappa}^{2} \sin \beta} S_{\tau p} \ddot{x} + \frac{\rho S_{\kappa}}{S_{\tau p} \sin \beta} \dot{x}^{2} - \rho_{_{3}M} = 0 \quad \pi p_{M} \quad l_{3} \leq x < l_{4}; \end{split}$$

$$(21)$$

$$l_{3} \rho g \sin \alpha + \frac{(l_{4} - l_{3}) \rho g \sin \gamma}{\sin \beta} + \frac{S_{\kappa}}{S_{p} \sin \beta} \rho g t \dot{x} + k_{2T}(x) \frac{S_{TP}^{2}}{\sin^{2}\beta} \dot{x}^{2} \sin \dot{x} + \frac{m(x)}{S_{\kappa} \sin \beta} S_{TP} \ddot{x} + \rho \frac{S_{\kappa}}{S_{TP} \sin \beta} \dot{x}^{2} - \rho_{3M} = 0 \quad \Pi p_{M} \quad x \ge l_{4}.$$
(22)

Решив полученные выше уравнения относительно старшей производной, получим задачу с начальными условиями или задачу Коши. Полученные дифференциальные уравнения второго порядка описывают нелинейные колебательные процессы. Данные уравнения решаются относительной производной, т.е. их решением являются уравнения фазовых траекторий, которые аналитически неинтегрируемы и получение переходных характеристик возможно только численными методами.

На базе данных дозатора магниевых сплавов [6] с погружным МГД-двигателем ЦИНС-8/24 [3] составлена программа расчета переходных пусковых характеристик на ЭВМ в коде "ФОР-ТРАН-ИФВЭ-МИЭМ".

Алгоритм расчета переходных характеристик на ЭЕМ построен таким образом, что при достижении значения $x = l_4$, т.е. когда дозатор начинает выдавать металл, отключается питание от индуктора МГД-двигателя и I = 0. В алгоритме расчета предусмотрены два режима питания МГД-двигателя. В первом режиме ток индуктора не изменяется во времени цикла дозирования. Во втором режиме, после заполнения канала, т.е. после пуска



Рис. 3. Переходная характеристика процесса дозирования при $b_n = 8 \, au$.



Рис. 4. Переходная характеристика процесса дозирования при $l_n = 2 \ \tau'$.

МГД-двигателя, ток уменьшается скачкообразно на 20 % и после этого остается постоянным до конца цикла.

На рис. З и 4 представлены результаты расчета переходных характеристик при питании индуктора от источника тока. Анализ результатов расчета показывает, что в первом режиме питания и при погружении $l_n = \delta \tau$ обеспечивается пуск установки во всем диапазоне рабочих токов. При глубине погружения $l_n =$ = 2τ и токе $I_4 < 30$ А в металлопроводе возникает колебательный процесс и установка не запускается. Это связано с недостаточностью развиваемого МГД-двигателем электромагнитного давления для преодоления гидростатического давления.



Рис. 5. Зависимости максимальной скорости жидкого металла в металлопроводе от уровня погружения МГД-двигателя.

На рис. 5 представлены зависимости максимальной скорости жидкого металла в металлопроводе от уровня погружения. Характеристика $\dot{x}_{MGKC} = f(l_n)$ имеет максимум при $l_n = 4\tau$, причем при увеличении глубины погружения существенно уменьшается максимальная скорость жидкого металла в переходном процессе. Это связано с постепенным увеличением электромагнитного давления, а тем самым и ускорения при движении жидкого металла по каналу МГД-двигателя вверх, причем начальная масса при малых уровнях погружения является незначительной.

При уровне погружения l_n < 27 максимальная скорость жидкого металла резко уменьшается, так как МГД-двигатель работает в неуверенной зоне пуска.

На рис. 6 представлены зависимости длительности заполнения металлопровода жидким металлом от глубины погружения МГД-двигателя. В диапазоне токов от 30 до 50 А время запол-


Рис. 6. Зависимости длительности заполнения металлопровода жидким металлом от уровня погружения МГД-двигателя - расчет 0 - эксперимент.

нения гидротракта мало зависит от уровня погружения. Из сравнения данных рис. 5 и 6 можно сделать вывод, что при малых уровнях погружения путь движения жидкого металла, а также его скорость являются максимальными, а при больших уровнях погружения это наоборот. Кроме того, при таких значениях токов в уравнении (I) электромагнитное давление сильно превышает другие слагаемые. При токе $I_1 = 20$ А, когда электромагнитное давление уже сравнимо с другими слагаемыми, время заполнения гидротракта значительно увеличивается.

Из сравнения расчетных и экспериментальных результатов на рис. 6 видно, что точность расчетов остается в пределах 20 - 30 %.

Во втором режиме питания МГД-двигателя пуск МГД-привода не осуществляется во всем диапазоне рабочих токов (рис. 7 и 8). При токе I₁ = 20 A и погружении $l_n = 8\tau$ (рис. 7) в металлопроводе возникают колебания уровня металла. При погружении $l_n = 2\tau$ пуск установки возможен только при токах I₁ > 40 A.

Полученные расчетные характеристики переходных процессов МГД-привода позволяют получить значения выделяемых доз после численного интегрирования функции Q = f(t).



Рис. 7. Переходная характеристика процесса дозирования во втором режиме питания при $l_n = 8 \mathcal{V}$.



Рис. 8. Переходная характеристика процесса дозирования во втором режиме питания при $l_n = 2 \, \mathcal{C}$.

Литература

I. Переходные процессы МГД-привода / Ю.Я. Лаугис, Т.В. Лехтла, А.Ф. Оорн, Х.А. Саккос. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1981, № 520, с. 65-75.

2. И д е л ь ч и к И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.

З. Тийсмус Х.А., Лаугис Ю.Я. Автоматизированный МГД-привод. М.: Энергия, 1980. 160 с.

4. 0 о р н А.Ф., Л о й г о м В.В. К определению механической и внутренней гидромеханической характеристики индукционных линейных и МГД-двигателей при α/𝒴 =∞. – Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1982, № 539, с. 65-71.

5. В о л ь д е к А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. 272 с.

6. Лаугис Ю.Я., Оорн А.Ф., Петтай Э.Н. Передвижной МГД-привод — Литейное производство, 1984, № 2, с. 28-29.

J. Laugis, A. Oorn

Dynamikprozesse im Antrieb mit Tauchen des magnetohydrodynamischen Motors ins flüssige Metall

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird das Anlassen eines magnetohydrodynamischen Antriebes mit Tauchen des magnetohydrodynamischen Motors ins flüssige Metall behandelt.

Auf Grund der experimentell ermittelten Resultate wurden die Formeln für die Berechnung der mechanischen Kennlinien der magnetohydrodynamischen Induktionsmotoren und die Bewegungsgleichungen für Flüssigkeit im hydraulischen System des Antriebes zusammengestellt. Dabei wird berücksichtigt, dass die hydraulischen Verluste, der hydrostatische und der elektromagnetische Druck des Motors von den Bewegungskoordinaten abhängen.



№ 627

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУЛЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.318.38

В.В. Лойгом, Х.А. Саккос

РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ МГД-ПРИВОДА

На основе краткого обзора работ, выполненных в ТПИ с 1965 г. в области исследования динамики МГД-привода, ниже рассматриваются теоретические аспекты этих исследований с целью обобщения и выявления перспективных направлений в данной области.

Первые исследования динамики МГД-привода на базе плоских индукционных насосов ЭМН-6 и ЭМН-7 с тонкостенным каналом, проведенные на ртутном стенде [I, 2,3], показали, что динамические процессы в МГД-приводе при единичной возмущающей функции имеют колебательный характер и затухают в течение 6 – 8 секунд. Однако в этих работах не были раскрыты физические причины возникновения такой колебательности подачи.

В [4] для описания динамических процессов в МГД-приводе была разработана расчетная модель МГД-привода, для которого общее уравнение движения МГД-привода, полученное на основе баланса давлений, имеет вид:

$$P_{3M} = P_c = P_q$$

где р_{эм} - электромагнитное давление, развиваемое МГД-двигателем в слое жидкого металла;

- рс статическое давление, обусловленное гидростатическим давлением столба жидкого металла р_{2с} и потерями давления в гидротракте р₂: р_с=р_{2с}+р₂;
- рд динамическое давление, возникающее в связи с изменением кинетической энергии системы вследствие изменения подачи (скорости течения) и переменности массы перемещаемой жидкости.

При составлении расчетной модели МГД-привода потери давления в гидротракте считались пропорциональными квадрату подачи (средней скорости течения), как это было сделано и в ранних работах [5, 6], т.е. гидравлические потери давления в гидротракте

$$p_2 = k_2 Q^2 sign Q$$
,

где k₂ - коэффициент гидравлических потерь;

Q - подача перемещаемой жидкости.

Полученная таким образом расчетная модель не принимает во внимание изменения локальных скоростей в объеме гидротракта, и процессы динамики МГД-привода решаются в электродинамическом приближении [7].

Первые расчетные модели [8, 9] были созданы для случая, когда электромагнитное давление зависит от подачи линейно:

$$p_{\mathfrak{P}} = p_{\mathfrak{o}} U_{\mathfrak{P}}^{2} (1 - Q/Q_{\mathfrak{o}}),$$

где р. - единичное давление;

U_ф - напряжение питания МГД-двигателя;

Q. - подача идеального холостого хода.

В предположении, что гидротракт полностью заполнен перемещаемой жидкостью и гидростатическое давление постоянное (p_{2c} = p_{2co}), уравнение движения МГД-привода принимает вид уравнения Рикатти [8]:

$$\frac{mdQ}{F_{\nu}^{2}dt} + k_{2}Q^{2}signQ + \frac{p_{0}}{Q_{0}}U_{\phi}Q - p_{0}U_{\phi}^{2} + p_{2co} = 0,$$

где m - масса перемещаемой жидкости;

F. - эквивалентное поперечное сечение гидротракта.

В результате линеаризации последнего уравнения динамика МГД-привода в "малом" описывается передаточной функцией звена первого порядка.

Этой моделью все же не было возможно объяснить возникновение колебаний подачи, наблюдаемых в [I, 2]. Дополнительные экспериментальные исследования показали, что причиной возникновения петли на экспериментальных амплитуднофазовых частотных характеристиках было наличие свободных илощадей перемещаемой жидкости в ртутных манометрах, а резонансные явления обусловлены наличием свободной поверхности жидкого металла в разливочном сосуде и упругими колебаниями тонкостенного канала МГД-двигателя [9].

Для изучения влияния упругости в [9] составлена расчетная модель с одним упругим звеном в двухмассовой гидромеханической системе МГД-привода, причем давление упругих деформаций рув первом приближении принято пропорциональным объемной деформации ΔV канала МГД-двигателя:

$$c_{ij} = c \Delta V$$
,

где с - коэффициент жесткости канала МГД-двигателя.



Рис. 1. Расчетная модель МГД-привода с упругим элементом. 1 и 2 - расходный и приемный резервуары; 3 - МГД-двигатель; 4 и 5 - всасывающая и напорная части гидротракта; 6 - канал МГД-двигателя с упругими стенками.

Согласно расчетной модели, показанной на рис. I, динамика МГД-привода с учетом упругости канала имеет следующий вид:

$$p_{3M} - c\Delta V - p_{2c01} - k_{21}Q_1^2 \operatorname{sign} Q_1 = \frac{m_1 dQ_1}{F_K^2 dt} \\ c\Delta V - p_{2c02} - k_{22}Q_2^2 \operatorname{sign} Q_2 = \frac{m_2 dQ_2}{F_c^2 dt} \right\}$$

где индексы I и 2 обозначают величины первой и второй части гидротракта.

Дальнейшее исследование динамики МГД-привода [10, 11] тесно связано с разработкой систем порционного дозирования жидких металлов. При разработке таких систем необходимо учитывать, что в процессе дозирования жидкий металл постепенно движется по гидротракту в зависимости от режима работы дозатора (пуск, заполнение гидротракта: дозирование, остановка и т.д.). Вследствие этого анализ динамики МГД-привода существенно усложняется, так как масса жидкого металла, потери давления в гидротракте, а в некоторых случаях как электромагнитное, так и гидростатическое давления являются функциями подачи. Например, при дозировании жидкого металла из плавильной печи гидростатическое давление определяется выражением

$$p_{2c} = p_{2c0} + \frac{\rho_g}{F_{\kappa}} \int Q dt = p_{2c0} + k_{2c} \int Q dt,$$

где р - плотность дозируемой жидкости;

q - ускорение силы тяжести;

k_{2c} - коэффициент гидростатического давления.

Так как развиваемое МГД-двигателем давление зависит от степени заполнения канала, то при составлении и решении уравнений движения целесообразно пользоваться понятием координаты движения. Координата движения х представляет собой путь, пройденный фронтом перемещаемой жидкости в гидротракте от условно выбранного начала координат, поэтому она связана с подачей МГД-привода следующим соотношением:

$$\frac{1}{12} = \frac{Q}{F}$$

В общем случае динамическое давление

$$p_{g} = \frac{m(x)d^{2}x}{F_{K}dt^{2}} + \frac{1}{2F_{K}}\left(\frac{dx}{dt}\right)^{2}\frac{dm(x)}{dx}$$

имеет составляющие, которые учитывают изменение кинетической энергии системы от изменения координаты движения и от переменной массы m(x).

Таким образом, общее уравнение движения в случае жесткого гидротракта имеет вид:

$$\frac{m(\infty)d^2x}{F_{\kappa}dt^2} + \frac{1}{2F_{\kappa}}\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 \frac{dm(\infty)}{dx} = p_{\mathfrak{M}}(\infty) - k_2(\infty) F_{\kappa}^2 \left(\frac{d\infty}{dt}\right)^2 \operatorname{ign}\left(\frac{dx}{dt}\right) - p_{\mathfrak{co}} - k_{\mathfrak{cc}}F_{\kappa}x.$$

При исследовании дозаторных режимов часто считают, что доля динамического давления от переменности перемещаемой массы мала и им можно пренебречь [5, I0, II]. При линейной зависимости электромагнитного давления МГД-двигателя, т.е. когда

$$p_{\mathfrak{PM}}(\mathfrak{x}) = p_{\mathfrak{PM0}}(1 - Q/Q_0) = p_{\mathfrak{PM0}}(1 - K_Q F_{\kappa} d\mathfrak{x}/dt),$$

уравнение движения имеет вид:

$$\dot{c}$$
 + a (x) \dot{x} sign(x) + c(x) \dot{x} + b(x) = 0,

где

$$\dot{x} = dx/dt;$$

$$a(x) = k_{2}(x) F_{k}^{3}/m(x);$$

$$c(x) = p_{9M0} K_{Q} F_{k}^{2}/m(x);$$

$$b(x) = F_{k} (k_{2c} F_{k} x + p_{2c0} - p_{9M0})/m(x).$$

Подстановкой $y(x) = \dot{x}(t)$ последнее уравнение приводится к уравнению Абеля.

Когда можно пренебречь влиянием скольжения на электромагнитное давление, т.е. $K_Q = 0$, тогда уравнение динамики МГД-привода принимает вид $\ddot{x} + a(x) \dot{x}^2 \sin(n(\dot{x}) + b(x)) = 0$

и подстановкой $y(x) = \dot{x}(t)$ оно преобразуется в уравнение Бернулли.

В случае, когда гидротракт полностью заполнен перемещаемой жидкостью, $k_2 = const$. Если в этом случае можно пренебречь изменением гидростатического давления ($p_{2c} = const$), то уравнение динамики МГД-привода преобразуется в уравнение Рикатти:

где

 $\dot{Q} + a Q^{2} sign Q + cQ = 0,$ $\dot{Q} = dQ/dt;$ $a = k_{2} F_{\kappa}^{3}/m;$ $c = F_{\kappa}^{2} K_{Q} p_{\Theta MO}/m;$ $b = F_{\kappa}(p_{2c0} - p_{\Theta MO})/m.$

В квазиустановившемся режиме, когда подача МГД-привода при неизменных входных величинах изменяется за счет изменения гидростатического давления, $p_{\mathfrak{IM}} = p_{\mathfrak{IM}0}(1 - K_{\mathfrak{Q}}\mathfrak{Q}), k_2 = \operatorname{const}, m = = \operatorname{const}, dQ/dt = 0$ и уравнение динамики принимает вид

где

 $a\dot{x}^2$ sign $(\dot{x}) + c\dot{x} + b = 0$,

 $a = k_2 F_{\kappa}^2$; $c = F_{\kappa} K_{Q} p_{\Theta MO}$; $b = p_{2co} - p_{\Theta MO}$.

При исследовании динамики МГД-привода многое зависит от правомочности выбранной модели расчета, от умелой оценки основных факторов, влияющих на динамику МГД-привода. К Haстоящему времени наиболее полно исследованы случаи с неизменной массой, постоянными гидравлическими потерями и -01 стоянным гидростатическим давлением [II-I3]. В [I4-I6] -идп ведена методика составления математической модели для решения различных модификаций уравнения движения на АВМ. Для определения характерных режимов порционного дозирования B [17] предлагается использовать универсальные кривые переходных процессов, а в [18], базируясь на работе [17], дается аналитическое решение уравнения движения для определения дозы при четырехэтапном дозировании.

В [19] рассматривается проблема расчета пускового режима неполностью затопленного погружного МГД-привода и приводится методика его решения на ЭЕМ для случая $p_{3M} = f(x)$, m = f(x) и $k_2 = f(x)$.

Как видно из вышеприведенного, теоретические исследования динамики МГД-привода в "электродинамическом" приближении развивались от составления простейших моделей до расчета сложных нелинейных случаев дозирования на ЭЕМ. Разработанная обобщенная модель расчета оказалась плодотворной для решения ряда задач динамики индукционного МГД-привода. Кроме того, данная расчетная модель может быть использована для расчета динамики и других типов МГД-привода. При этом только необходимо знать зависимость между подачей или координатой движения и электромагнитным давлением МГД-двигателя, а также характеризующие данный привод геометрические размеры.

Так, например, модель может быть использована для расчета динамики кондукционного МГД-привода постоянного тока, где зависимость между подачей и электромагнитным давлением оказывается линейной [5, 6].

Недостатком рассмотренной обобщенной модели следует Считать, что сча не принимает во внимание изменение режима течения от ламинарного к турбулентному. Однако такое уточнение может быть сделано при расчете процессов, в которых может изменяться режим течения поэтапно, принимая при этом в ламинарном режиме течения потери давления в гидротракте.

В дальнейшем следует развивать исследования динамики МГД-привода с учетом упругих элементов в гидротракте, а также релейной зависимости между давлением и подачей за счет деформации канала. Особый интерес представляет решение задачи динамики МГД-приводов с разветвленными гидротрактами.

Литерат ура

I. Лаугис Ю.Я., Силламаа Х.В., Тийсмус Х.А. Экспериментальное определение передаточной функции индукционного насоса. -Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1968, № 266, с. 83-90.

2. Тийсмус Х.А., Лаугис Ю.Я., Саккос Х.А. Экспериментальное определение передаточной функции МГД-привода. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1970, № 301, с. 95-102. 3. Лойгом В.В., Лаугис Ю.Я., Тийсмус Х.А. Стенд для испытания МГД-насосов и датчиков скорости.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1970, № 284, с. 153-164.

4. Гидравлические характеристики МГД-привода/ Ю.Я. Лаугис, В.В. Лойгом, Х.А. Саккос, Х.А. Тийсмус. – Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1971, № 315, с. 47-57.

5. Лиелаусис О.А. Гидродинамика жидкометаллических МГД-устройств. Рига: Зинатне, 1967. 196 с.

6. Бирзвалк Ю.А.Основы теории и расчета кондукционных МГД-насосов постоянного тока. Рига: Зинатне, 1968. 235 с.

7. В о л ь д е к А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Ленинград: Энергия, 1970. 272 с.

8. Лойгом В.В. Упрощенная передаточная функция МГД-привода: сборник материалов к У Таллинскому совещанию по электромагнитным расходомерам и электротехнике жидких проводников. Вып. 6. Издание НТО Приборпром ЭССР, Таллин, 1972, с. 64-67.

9. МГД-привод как объект автоматического регулирования / Ю.Я. Лаугис, Т.В. Лехтла, В.В. Лойгом, Х.А. Саккос, Х.А. Тийсмус. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1971, № 315, с. 35-46.

IO. Саккос Х.А., Лехтла Т.В., Тийсмус Х.А. Уравнения движения МГД-привода. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1975, № 382, с. 61-73.

II. Тийсмус Х.А., Лаугис Ю.Я. Автоматизированный МГД-привод. - М.: Энергия, 1980. 160 с.

I2. Лехтла Т.В., Саккос Х.А. Гидромеханические переходные процессы идеализированной модели МГД-привода. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1981, № 520, с. 87-96.

13. Некоторые вопросы динамики индукционного МГД-привода / А.К. Арусоо, В.В. Лойгом, Т.О. Рандоя, Х.А. Саккос, Х.А. Тийсмус. – Сб. материалов восьмого Рижского совещания по магнитной гидродинамике П МГД машины. Рига: Зинатне, 1975, с. 176-178. 14. Тийсмус Х.А., Саккос Х.А., Лойгом В.В. Математическое моделирование автоматизированного МГД-привода с астатическим регулятором. - Сб. материалов к УІ Таллинскому совещанию по электромагнитным расходомерам и электротехнике жидких проводников. Электропривод. Таллин, 1973, с. 13-20.

I5. Саккос Х.А. Математические модели МГД-привода.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1976, № 398, с. 105-114.

I6. Сакко с Х.А. Математическое моделирование автоматизированного МГД-привода. ИВУЗ Электромеханика, 1983. № 4, с. 41-45.

17. Типовые характеристики для расчета переходных процессов подачи насосных МГД-приводов / Т.В. Лехтла, Х.А. Саккос, Х.А. Тийсмус, Р.А. Тээметс. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1978, № 456, с. 67-74.

18. Каск Р.Б., Лаугис Ю.Я., ТээметсР.А. Некоторые вопросы создания автоматизированной литейной установки. – Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1980, № 500, с. 17-27.

19. Переходные процессы МГД-привода / Ю.Я. Лаугис, Т.В. Лехтла, А.Ф. Оорн, Х.А. Саккос. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1981, № 520, с. 65-74,

20. Лаугис Ю.Я., Оорн А.Ф. Динамические работы электропривода с погружным МГД-двигателем. См. наст. сб. с. 27-37.

V. Loigom, H. Sakkos

Entwicklung der theoretischen Forschungen der Dynamik des MHD-Antriebes

Zusammenfassung

In diesem Aufsatz sind die Arbeiten auf dem Gebiete der theoretischen Forschungen der dynamischen Vorgängen im MHD-Antriebe, die an der Technischen Hochschule Tallinn seit 1965 durchgeführt wurden, behandelt und verallgemeinert. Nº 627

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.318.38

В.В. Лойгом, Х.А. Саккос

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ МГД-ПРИВОДА

В [1] были рассмотрены аспекты теоретических исследований динамики МГД-привода, выполненных в ТПИ за 1960-1980 гг.

В данной статье обобщены результаты экспериментальных исследований динамических процессов в МГД-приводах.

Исследуемые МГД-приводы относились в основном к приводам литейного и металлургического назначения с плоскими [2 ...8, IO] или цилиндрическими [5, 9] индукционными МГД-двигателями. Гидротракт был упругий [2...5] или жесткий [6...8]. Перекачиваемыми металлами были ртуть [2...5], магний [6... 8] и натрий [9...IO]. При этом канал МГД-двигателя был полностью заполнен металлом, двигатели работали при скольжении, близком к единице. На основе проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

Для МГД-приводов с жестким гидротрактом электродинамический подход к расчету динамики оправдан. Для конкретного привода необходимо уточнить вопрос предпочтения нелинейной или линеаризованной модели расчета. Первые наблюдения показывают, что нелинейная модель имеет предпочтение для расчетов динамики в "большом".

При перекачивании агрессивных жидких металлов наблюдается увеличение гидравлических потерь гидротракта вследствие накопления осадков на его стенках. Изменение гидравлических свойств имеет сложную корреляцию с количеством пусков привода. Эти наблюдения относятся к магниевым приводам металлургического и литейного назначения. В замкнутых контурах такие явления не наблюдались.

Увеличение гидравлических потерь связано с изменением коэффициента гидравлического сопротивления за счет увеличе-

ния шероховатости гидротракта, а также с уменьшением его активной площади и периметра. Приближенную оценку изменения коэффициента гидравлических потерь можно дать при помощи эксплуатационного коэффициента

$$K_a = K_{2MQKC}/K_2$$

где Камакс - коэффициент гидравлических потерь в конце эксплуатации гидротракта;

k₂ - коэффициент гидравлических потерь в начале эксплуатации.

По нашим наблюдениям для магниевых приводов при k_a>IO гидротракт следует заменить.

Увеличение гидравлических потерь приводит к уменьшению длительности переходного процесса (рис. I), а также к уменьшению коэффициента передачи объекта при сохранении постоянства подачи. Вследствие этого при определении требуемого коэффициента передачи системы, исходя из допустимого статического отклонения при разработке систем автоматической стабилизации подачи, расчеты следует провести при минимальном значении коэффициента гидравлических потерь и максимальном значении гидростатического давления. Расчет динамики, однако, следует вести для двух крайних значений коэффициента гидравлических потерь.

Предложенные в [I] математические модели справедливы в предположении, что при достаточно большом промежутке времени наблюдения средние значения пульсационных составляющих подачи t+t₁

 $Q_{cp}^{\circ} = \int_{1}^{t+t_{1}} Q^{\circ}(t) dt = 0,$

где Q°(t) - центрированные значения пульсационных составляющих подачи.

Однако эксперименты, проведенные на опытных МГД-приводах для ртути, натрия и магния [9] показали, что при разработке систем автоматического управления необходимо обязательно учитывать существенное влияние случайных флуктуаций подачи. Экспериментально установлено, что МГД-двигатель является источником, который увеличивает уровень и спектральный состав флуктуаций подачи по сравнению с движением металла в трубопроводе при постоянном давлении газа.

В работе указывается [9], что случайные флуктуации подачи могут быть охарактеризованы корреляционными функциями типа



a)



Рис. 1. Кривые переходного процесса МГД-привода: а) с плоским МГД-двигателем, б) с цилиндрическим МГД-двигателем, 1 - в конце эксплуатации гидротракта; 2 - в начале эксплуатации гидротракта. $R(\tau) = D_{x} e^{-\alpha |\tau|},$ $R(\tau) = D_{x} e^{-\alpha |\tau|} \cos \beta \tau,$

или

- где D_x дисперсия подачи;
 - а. В коэффициенты затухания;
 - т время.

Вследствие флуктуационных явлений задача обеспечения заданной точности систем автоматического управления существенно усложняется. При синтезе системы должна быть обеспечена минимальная дисперсия с помощью выбора оптимальной передаточной функции системы. Если требования к точности не очень жесткие, можно рекомендовать приемы подавления флуктуаций и применения САУ с астатическим регулятором.

В заключение следует отметить, что к настоящему времени разработаны основные модели для описания динамических процессов в МГД-приводе, а также получен опыт разработки простейших систем автоматического управления. Для успешного применения МГД-приводов в современных технологических процессах следует существенно расширить экспериментальные исследования, а также разработать требования к системам управления МГД-приводами.

Литература

І. Лойгом В.В., Саккос Х.А. Развитие теоретических исследований динамики МГД-привода. См. наст. сб. с. 39-46.

2. Лаугис Ю.Я., Силламаа Х.В., Тийсмус Х.А. Экспериментальное определение передаточной функции индукционного насоса.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1968, № 266, с. 83-90.

3. Тийсмус Х.А., Лаугис Ю.Я., Саккос Х.А. Экспериментальное определение передаточной функции МГД-привода.-Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1970, № 301, с. 95-102.

4. Лойгом В.В., Лаугис Ю.Я., Тийсмус Х.А. Стенд для испытания МГД-насосов и датчиков скорости. – Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1970, № 284, с. 153-164. 5. МГД-привод как объект автоматического регулирования/ Ю.Я. Лаугис, Т.В. Лехтла, В.В. Лойгом, Х.А. Саккос, Х.А. Тийсмус – Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1971, № 315, с. 35 -45.

6. МГД-привод для перекачивания жидкого магния. В сб.: МГД в металлургии и литейном производстве / А.К. Арусоо, Х.Х. Карро, Ю.Я. Лаугис, Я.К. Лоотус, В.В. Лойгом, Х.А. Саккос, Х.А. Тийсмус. ИПЛ АН УССР, Киевский дом научно-технической пропаганды, Киев, 1972, с. 126-130.

7. Тиристорный МГД-привод для перекачивания жидкого магния / А.К. Арусоо, Ю.Я. Лаугис, Т.В. Лехтла, В.В. Лойгом, X.A. Саккос, К.Ф. Шильф, X.A. Тийсмус. – Сборник материалов седьмого совещания по магнитной гидродинамике. Ш. Применение МГД в металдургии. Рига: Зинатне, 1972, с. 122-124.

8. Исследование эксплуатационных свойств промышленного тиристорного МГД-привода для подачи магния на литейный конвейер / А.К. Арусоо, Р.Б. Каск, В.В. Лойгом, Х.А. Саккос. – Сборник материалов к УІ Таллинскому совещанию по электромагнитным расходомерам и электротехнике жидких проводников. Электропривод. Таллин, 1973. с. 31-35.

9. Лойгом В.В., Саккос Х.А., Тийсмус Х.А. Системы автоматической стабилизации подачи МГД-приводов. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1979. № 476. с. 3-11.

IO. Система автоматической стабилизации подачи МГД-привода / А.К. Арусоо, В.В. Лойгом, Х.А. Саккос, λ.Φ. Оорн. -Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1983, № 559, с. 13-21.

V. Loigon, H. Sakkos

Experimentelle Forschungen der Dynamik des MHD-Antriebes

Zusammenfassung

In diesen Aufsatz sind die Ergebnisse der experimentellen Forschungen verallgemeinert, die an der Technischen Hochschule seit 1965 durchgeführt wurden. Ebenso sind Empfehlungen für die Fortsetzung der Forschungen gegeben. ₩ 627

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 62-52 (075.8)

Я.Я. Томсон

О СОСТАВЛЕНИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Уже в 1953 г. Мейзоном был предложен метод составления передаточных функций систем автоматического регулирования любой сложности на основе структурных схем, без предварительного преобразования этих схем. Однако этот метод в расчетах динамики систем автоматического управления (САУ) электроприводами до сих пор редко применяется.

При применении традиционных методов для составления передаточных функций требуются из теории автоматического регулирования хорошо известные предварительные преобразования исходной структурной схемы САУ. Например, для определения передаточной функции по структурной схеме, показанной на рис. I (в схеме нет перекрещивающихся связей), можно ее заменить эквивалентной схемой (рис. 2). На основе этой схемы передаточная функция (регулируемый параметр х_п относительно управляющего воздействия х_о) запишется в следуищем виде:

$$w_{x_{n}x_{0}} = \frac{W_{1}(W_{2}+W_{7})\tilde{1}W_{1}}{1+W_{1}W_{9}(W_{2}+W_{7})\tilde{1}W_{1}+W_{3}W_{4}W_{8}}$$
(1)

Следует отметить, что для сокращения записи, в уравнении (1), а также в других уравнениях и на рисунках настояцей статьи, передаточные функции звеньев и операторные выражения написаны без оператора "p", т.е., например, взамен обозначения W(p) применяется символ W.

Если структурная схема имеет перекрецивающиеся связи (рис. 3), то для выражения передаточной функции требуются более сложные промежуточные преобразования исходной структурной схемы и более трудоемкие вычисления. Например, структурная схема, приведенная на рис. 3, может быть представле-



на в виде эквивалентной схемы (рис. 4), на базе которой можно записать

$$W_{X_{\Pi}X_{0}} = \frac{W_{1}W_{21}W_{23}W_{6}}{1 + W_{1}W_{21}W_{23}W_{6}W_{10}}.$$
 (2)

После подстановки эквивалентных значений передаточных функций W₉₁; W₉₂ и W₉₃ (приведены на рис. 4) и после несложных алгебраических вычислений передаточная функция рассматриваемой системы записывается в виде:

$$W_{X_{\Pi}X_{0}} = \frac{W_{1}(W_{2}W_{3} + W_{7}) \tilde{\Pi} W_{1}}{1 + W_{1}W_{10}(W_{2}W_{3} + W_{7}) \tilde{\Pi} W_{1} + W_{8} \tilde{\Pi} W_{1} + W_{5}W_{8}W_{9}}.$$
 (3)

Однако результаты, представленные уравнениями (I) и (3), могут быть записаны прямо из первоначальных структурных схем (соответственно рис. 2 и 3) на основе выражения Мейзона:

$$W = \frac{\sum_{n=1}^{n} \Pi W_{n}}{1 \pm \sum_{n=1}^{b} \Pi W_{0}},$$
 (4)

где

∑ ПW_п - передаточная функция всех прямых цепей (число которых равно с) между величинами, для которых передаточная функция системы определяется;

∑ ПW₀ - передаточная функция всех цепей (число которых равно b), замкнутых с обратными связями.

Знак "+" соответствует отрицательной обратной связи, а "-" - положительной обратной связи.

Применение выражения (4) не требует предварительных преобразований структурной схемы, для получения окончательного вида передаточной функции требуется также минимальный объем математических преобразований и вычислений.

Например, если выразить передаточную функцию по структурной схеме, представленной на рис. I, то в ней между величинами X_п и X₀ существует две прямые цепи, в состав которых входят следующие звенья:

$$W_1 W_2 W_3 W_4 W_5 W_6 = \prod_{1}^{6} W_1 - \text{первая цепь};$$

 $W_1 W_7 W_3 W_4 W_5 W_6 = W_1 W_7 \prod_{1}^{6} W_1 - \text{вторая цепь}.$

Тогда

$$\sum_{1}^{2} \prod W_{n} = W_{1}(W_{2} + W_{7}) \prod_{3}^{6} W_{i}.$$



Рассматриваемая структурная схемы содержит три цепи, которые замкнуты с отрицательными обратными связями и состоят из следующих звеньев:

> $W_1 W_2 W_9 \int_3^6 W_i$ - первая замкнутая цепь; $W_1 W_7 W_9 \int_3^6 W_i$ - вторая замкнутая цепь; $W_3 W_4 W_8$ - третья замкнутая цепь:

Следовательно,

Таким образом, по выражению (4)

$$W_{X_n X_0} = \frac{\sum_{n} \prod W_n}{1 \pm \sum_{n} \prod W_0}$$

можно записать уже знакомый результат, представленный уравнением (I).

Второй пример составления передаточной функции приводится по структурной схеме, показанной на рис. 3, на основе которой могут быть записаны следующие выражения как для прямых, так и для замкнутых с обратной связью цепей:

$$W_{1} W_{2} W_{3} W_{4} W_{5} W_{6};$$

$$W_{1} W_{7} W_{4} W_{5} W_{6};$$

$$W_{1} W_{2} W_{3} W_{4} W_{5} W_{6} W_{10};$$

$$W_{1} W_{7} W_{4} W_{5} W_{6} W_{10};$$

$$W_{3} W_{4} W_{5} W_{8};$$

$$W_{5} W_{6} W_{9}.$$
(5)

Следовательно, для этой системы

$$\sum_{i=1}^{2} \prod W_{n} = W_{1}(W_{2}W_{3} + W_{7}) \prod_{i=1}^{6} W_{i};$$

$$\sum_{i=1}^{4} \prod W_{0} = W_{1}W_{10}(W_{2}W_{3} + W_{7}) \prod_{i=1}^{6} W_{i} + W_{8} \prod_{i=1}^{5} W_{i} + W_{5}W_{6}W_{9}.$$

Таким образом, по выражению (4)

$$W_{x_{\Pi}x_{0}} = \frac{\sum_{1}^{2} \Pi W}{1 \pm \sum_{1}^{2} \Pi W_{0}}$$

можно снова записать результат, знакомый уже по уравнению (3).

По выражению (4) можно с минимальным трудом записать передаточную функцию и для других пар переменных САУ, показанной на рис. З. Например, передаточная функция по величине Х₉ относительно Х₀ записывается в виде:

$$W_{x_{9}x_{0}} = \frac{W_{1}W_{9}(W_{2}W_{3} + W_{7}) \overset{n}{\downarrow} W_{i}}{1 + W_{1}W_{10}(W_{2}W_{3} + W_{7}) \overset{n}{\underline{\xi}} W_{i} + W_{8}\overset{n}{\underline{\xi}} W_{i} + W_{5}W_{6}W_{9}}.$$
 (6)

При этом не требуется никаких предварительных преобразований данной структурной схемы и запись передаточной функции получается сразу в окончательном виде.

Выразить указанную передаточную функцию при помощи традиционных методов не так легко. Например, применяя метод размыкания всех связей в структурной схеме, можно изобразить на основе рис. З эквивалентную схему, приведенную на рис. 5. В данном случае для составления передаточной функции следует исходить из следующей системы уравнений:

$$x_{2} = W_{1}(x_{0} - W_{10} \times n);$$

$$x_{3} = W_{2}x_{2} - W_{8}x_{6};$$

$$x_{4} = W_{3}x_{3} + W_{7}x_{2};$$

$$x_{5} = W_{4}x_{4} - x_{9};$$

$$x_{6} = W_{5}x_{5};$$

$$x_{9} = W_{5}W_{6}W_{9}W_{5}; \quad x_{5} = \frac{x_{9}}{W_{5}W_{6}W_{9}}$$

$$x_{n} = \frac{x_{9}}{W_{5}}.$$

Решив систему уравнений (7) относительно x₉ и x₀, можно в конечном итоге получить уже знакомое уравнение (6).

Однако в записи передаточных функций, представленных уравнениями вида (I), (3) и (6) для применения их в практических расчетах динамики САУ, требуются известные упрощения. Ниже, для составления передаточной функции САУ, применяемой в практических вычислениях, предлагается следующее предписание.

Если обозначить:

$$W_1 = \frac{L_1}{H_1}; W_2 = \frac{L_2}{H_2}; \dots W_n = \frac{L_n}{H_n},$$
то передаточная функция системы на основе структурной схемы определяется по следующему выражению:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^{m} \Pi E_{n} \cdot \Pi H_{\kappa n}}{\prod_{i=1}^{n} H_{i} \pm \sum_{i=1}^{n} \Pi E_{0} \cdot \Pi H_{\kappa 0}},$$
(8)

где ПЕ_п- произведение числителей передаточных функций всех звеньев рассматриваемой прямой цепи, расположенной между величинами структурной схемы, для кото-

້

, с, Д

рых передаточная функция определяется. Число прямых цепей равно q.

- ПН_{кп} произведение характеристических операторов всех остальных звеньев системы, т.е. кроме звеньев рассматриваемой цепи;
- 1 произведение характеристических операторов всех звеньев системы. Число звеньев в системе равно п;
- ПЕ₀ произведение числителей передаточных функций звеньев цепи, замкнутой с обратной связью. Число замкнутых с обратной связью цепей равно b;
- ПН_{ко} произведение характеристических операторов всех остальных звеньев системы, т.е. кроме звеньев рассматриваемой цепи.

В уравнении (8) знак "+" соответствует отрицательной обратной связи, а "-" - положительной обратной связи.

Следует отметить, что число множителей каждого слагаемого в уравнении (8) совпадает с числом звеньев в рассматриваемой системе, т.е. - равно п.

Пример практического применения выражения (8) предлагается произвести на базе структурной схемы, приведенной на рис. З. С учетом передаточных функций цепей, представленных выражениями (5), слагаемые для определения уравнения (8) получатся в виде:

 $E_{1} E_{2} E_{3} E_{4} E_{5} E_{6} H_{7} H_{8} H_{9} H_{10} = \prod_{1}^{6} E_{1} \cdot \prod_{7}^{10} H_{1};$ $E_{1} E_{7} E_{4} E_{5} E_{6} H_{2} H_{3} H_{8} H_{9} H_{10} = E_{4} \prod_{1}^{7} E_{1} \cdot H_{2} H_{3} \prod_{8}^{10} H_{1};$ $E_{4} E_{2} E_{3} E_{4} E_{5} E_{6} E_{10} H_{7} H_{8} H_{9} = E_{10} \prod_{7}^{7} E_{1} \cdot \prod_{7}^{7} H_{1};$ $E_{4} E_{7} E_{4} E_{5} E_{6} E_{10} H_{2} H_{3} H_{8} H_{9} = E_{1} E_{10} \prod_{7}^{7} E_{1} \cdot H_{2} H_{3} H_{8} H_{9};$ $E_{3} E_{4} E_{5} E_{8} H_{4} H_{2} H_{6} H_{7} H_{9} H_{10} = E_{8} \prod_{3}^{7} E_{1} \cdot H_{4} H_{2} H_{6} H_{7} H_{9} H_{10};$ $E_{5} E_{6} E_{9} H_{4} H_{2} H_{3} H_{4} H_{7} H_{8} H_{10} = E_{5} E_{6} E_{9} E_{7} E_{8} E_{10} \prod_{7}^{4} H_{1} .$ (9)

Передаточная функция для рассматриваемой системы, с учетом выражений (9) записывается в следующем виде:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^{2} \Pi E_{n} \cdot \Pi H_{\kappa n}}{\prod_{i=1}^{10} H_{i} + \sum_{i=1}^{4} \Pi E_{0} \cdot \Pi H_{\kappa 0}} =$$

$$=\frac{\prod_{i=1}^{n}E_{i}\cdot\prod_{i=1}^{n}H_{i}+E_{i}\prod_{i=1}^{n}E_{i}\cdotH_{2}H_{3}\prod_{i=1}^{n}H_{i}}{\prod_{i=1}^{n}H_{i}+E_{10}\prod_{i=1}^{n}E_{i}\cdot\prod_{i=1}^{n}H_{i}+E_{1}E_{40}\prod_{i=1}^{n}E_{i}\cdotH_{2}H_{3}H_{8}H_{9}}$$
(10)

$$-$$
 + E₈ $\frac{1}{3}$ E₁· H₁H₂H₆ H₇ H₉H₀ + E₅ E₆ E₉ H₇ H₈H₁₀ $\frac{1}{1}$ H₁

Знаменатель уравнения (10) является характеристическим уравнением замкнутой системы. Следовательно, по структурной схеме САУ можно непосредственно записать характеристическое уравнение системы в следующем виде:

$$\prod_{1}^{n} H_{i} \pm \sum_{1}^{b} \Pi E_{0} \cdot \Pi H_{\kappa_{0}} = 0.$$
 (II)

Из предложенных материалов вытекает, что выражение (4), а также выражения (8) и (II) позволяют упростить математический аппарат при анализе динамики сложных САУ электроприводами. Одновременно выражения (8) и (II) могут быть полезными при анализе и синтезе систем управления на ЭЕМ.

J. Tomson

Construction of Transfer Functions of the Automatic Control System of Electric Drive

Abstract

This paper presents a construction of transfer functions of the automatic control system of electric drives. The problem studied here is based on Mason method, but the material of the text is an advanced application of Mason theory. It contains necessary conclusions for the proposed method and is also completed by a solved example.



Nº 627

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 62-83:621.365.511

Т.Э. Роосимаа, Т.В. Лехтла

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ДЛЯ РЕЗКИ ТИТАНОВЫХ ЗАГОТОВОК

Технология резки титанового листа представляет собой предварительный подогрев листа во избежание возникновения микротрещин на линии отреза. Технологический комплекс (см. рис. I) для резки титановых заготовок содержит ножницы, индукционное подогревательное устройство, манипулятор для подачи листа, шкаф электропитания и шкаф управления.

Титановый лист устанавливается на стол-рольганг манипулятора и подается для подогрева и резания с помощью линейного электропривода каретки подачи. Для крепления листа манипулятор имеет захватное устройство. Необходимые для управления работой манипулятора сигналы обратной связи по скорости подачи и положению листа обеспечиваются при помощи тахогенератора, а также контактных и бесконтактных путевых выключателей.

Рама индукционного подогревательного индуктора прикреплена к столу-рольгангу. Индуктор состоит из верхней и нижней половин, причем верхняя половина индуктора при подаче листа поднимается, а при нагревании опускается с помощью пневмоцилиндров. Во время нагрева титановый лист прижимается между двумя половинами индуктора. Кроме того, для обеспечения более равномерного нагревания, лист прижимается между боковыми контактами, включение и отключение которых происходит также с помощью пневмоцилиндров. Управление процессом нагрева происходит либо в зависимости от продолжительности включения индуктора, либо в зависимости от температуры на линии отреза листа. Во втором случае можно достичь большую точность соблюдения заданной температуры нагрева. Необходимо, однако, учитывать, что данный способ связан с трудностя-

63



Рис. 1. Общая компановка технологического комплекса для резки титановых заготовок.

1 - манинулятор для подачи листа, 2 - шкаф управлення, 3 - шкаф электропитания, 4 - индукционный подогреватель, 5 - гильотинные ножницы.



Рис. 2. Граф-схема функционирования технологического комплекса для резки титановых заготовок. ми размещения температурных датчиков между движущимися половинами индуктора. Поэтому целесообразно использовать первый способ управления по времени, где предварительно с помощью эксперимента определяется необходимое время нагрева титановых листов разной толщины. Полученные при этом данные используются при дальнейшей автоматической работе комплекса в качестве задающих величин.

В шкафу электропитания размещены аппараты защиты и коммутации цепей индукционного подогревателя, а также конденсаторы для повышения коэффициента мощности установки.

Система управления манипулятром размещена в шкафу, имеющем встроенные пульт управления и содержащим трехфазный тиристорный регулятор напряжения для питания линейного асинхронного двигателя (ЛАД) и аппараты управления.

При работе комплекса возможны режимы однократного и многократного резания после каждого цикла подогрева. Во втором случае длина отрезаемых заготовок меньше ширины подогреваемой индуктором зоны, что позволяет после одного цикла нагрева отрезать несколько заготовок.

Синтез системы управления технологическим комплексом для резки титановых заготовок удобно провести на основе граф-схемы, представленной на рис. 2. В работе комплекса можно выделить три характерных цикла:

I) замена отрезаемого листа, которая проводится через I5...30 циклов подогрева;

 подогрев отрезаемого листа, который проводится через I...3 циклов резания заготовок;

3) резание заготовок с помощью ножниц.

На граф-схеме кружочками обозначены все возможные состояния системы управления комплексом и стрелками возможные переходы из одного состояния в другое. Сплошные линии соответствуют нормальным рабочим переходам, а пунктирные линии – другим возможным переходам, которые могут использоваться при проверке и наладке системы управления.

Содержание отдельных переходов следующее:

I

- начальная установка титанового листа под индуктором;

| 2 | - подключение к холодному листу боковых контактов; |
|---|---|
| 2, | - подключение боковых контактов к предварительно на- |
| | гретому листу, |
| 3 | - опускание верхней половины индуктора; |
| 4 | - нагрев листа; |
| 4, | - нагрев листа при автоматическом контроле за темпера- |
| | турой листа: |
| 5 | - подъем верхней половины индуктора; |
| 6 | - удаление боковых контактов; |
| 7 | - быстрое перемещение каретки подачи листа с подогре- |
| | тым листом: |
| 79 | - остывание листа под отключенным индуктором: |
| 7" | - перемещение каретки полачи листа с холодным листом: |
| 8 | - замедленное перемешение каретки подачи листа: |
| 9 | - Фиксация длины отрезаемой заготовки и установка лис- |
| 6. E. L. S | та под ножницами: |
| IO | - зажим листа под ножницами: |
| II | - отрезка заготовки: |
| 12 | - разжим листа: |
| I3 | - замедленное перемещение каретки подачи листа при мно- |
| | гократном отрезании после каждого шикла нагрева: |
| I4 | - замедленное обратное перемещение каретки подачи для |
| | нового шикла нагрева листа: |
| 14, | - замедленное обратное перемещение каретки подачи лис- |
| | та в случае, если отрезка заготовки не выполнялась: |
| I5 | - обратное перемещение каретки полачи лля замены листа: |
| I6 | - разжим захватного устройства: |
| 17 | - СНЯТИЕ ОСТАВШЕЙСЯ ПОЛОСИ СО СТОЛА РОЛЬТАНТА: |
| I8 | - установка на столе-рольганге нового листа: |
| 19 | - Зажим листа захватным устройством. |
| | |
| | при расоте комплекса предусмотрен режим замедленного |
| Переменения каретки полачи, что обеспечивает более точную | |

перемещения каретки подачи, что обеспечивает более точную остановку листа под индуктором и ослабление удара при упи-рании листа на упор ножниц.

Из граф-схемы следует, что в первую очередь необходимо обеспечить автоматическое чередование безусловных переходов, например 2, 3, 4, 5, 6 и 9, 10, 11, 12. Начало ряда безусловных переходов определяется либо командой от пульта управления (ручное управление), либо автоматической командой от системы управления, последующей после окончания предыдущего перехода. Следовательно, на пульте управления необходимо предусмотреть кнопки управления ножницами и кнопки управления нагревом листа.

Из вышесказанного следует, что циклы І...Ш повторяются с разной частотой. Наиболее часто повторяется третий цикл отрезания заготовок, состоящий из переходов 9, 10, 11, 12 и 13. В случае режима однократного резания, второй и третий циклы чередуются одинаковой частотой и работа комплекса соответствует переходам 2...6, 7, 8, 9...12 и 14 и снова 2... 6 и т.д. При необходимости замены листа вместо перехода 14 последуют переходы 15, 16, 17, 18, 19 и I, после чего работа комплекса начинается с переходов 2...6 и т.д.

В целях упрощения проверки и наладки комплекса в режиме ручного управления целесообразно использовать отдельные кнопки для включения питания индуктора и для включения пневмоцилиндров, фиксирующих лист, т.е. для включения боковых контактов и опускания верхней половины индуктора.

Для управления кареткой подачи листа применяется линейный реверсивный электропривод со стабилизацией скорости передвижения. Остановка привода после перехода I4 и переключения на замедленную скорость после перехода 7 осуществляется с помощью бесконтактных путевых переключателей.После перехода 8 лист упирается на ограничивающий упор ножниц, а линейный асинхронный двигатель отключается вручную или помощью реле времени. Переход I содержит дополнительную операцию для первоначальной отрегулировки бесконтактного путевого выключателя, обеспечивающего точную остановку листа под индуктором. Операция установки бесконтактного выключателя выполняется вручную. Переходы 16, 17, 18 и 19 также осуществляются вручную, но в дальнейшем возможна и автоматизация замены листа. Кнопки ручного управления линейным peверсивным электроприводом размещены на пульте управления. В режиме автоматического управления начало условных переходов 7, 13, 14 и 15 определяется логической схемой управления.

На граф-схеме знаком "+" обозначен переход, где выполняются необходимые условия для дальнейшей работы (обеспечивается заданная температура, необходимая ширина подогретой зоны или длина неотрезанного листа в захвате. Знак "-" соответствует невыполнению заданных условий, т.е. несоответствию температуры нагрева, недостаточной ширине подогретой зоны или длине оставшегося листа в захвате манипулятора.

Отдельную проблему представляет точная остановка листа под индуктором, поскольку длина листа каждого цикла резания уменьшается и каретка подачи листа должна позиционироваться в разных положениях относительно стола-рольганга. Для управления манипулятором здесь применяют скользящую по вторичной системе ЛАД втулку положение которой с каждым циклом изменяется в зависимости от длины отрезаемой заготовки. Принцип работы системы позиционирования показан на рис 3.

Ножницами 2 по линии отреза 3 отрезают полосу листа, длина которого (, определяется положением опор I. Индуктор предварительного подогрева 4 находится от линии отреза на расстоянии 12. Зона предварительного нагрева 5 должна находиться от края листа также на расстоянии l3, чтобы при последующей отрезке она совпала с линией отреза (см. рис. 3,б). Следовательно, при каждом обратном движении листа 6 от ножниц 2 в сторону индуктора 4 необходимо лист точно позиционировать под индуктором с учетом длины отрезаемой заготовки. С этой целью применяют скользящую по вторичной системе ЛАД 7 втулку 8. На внутренней поверхности последнего имеется фрикционная прокладка 9 для увеличения коэффициента трения во избежание его случайного скольжения по вторичной системе 7. Дополнительный упор II и бесконтактный датчик положения 13 закреплены к раме 12, причем расстояние OT упора II до датчика IЗ равно l₁ = l₂ - l₃. В таком случае по сигналу датчика 13 можно лист 6 точно позиционировать под индуктором 4 с учетом длины следующей отрезаемой заготовки

13. При подаче подогретого листа к ножницам 2 скользящая втулка 8 перемещается вместе с вторичной системой ЛАД 7 в сторону упора II. Момент упирания втулки совпадает с моментом попадания края листа на рабочую плоскость ножниц 2. Далее втулка проскальзывает по вторичной системе ЛАД 7 до момента упирания листа 6 на упор I, т.е. на расстояние 13. Лист 6 и вторичная система ЛАД перемещаются на расстояние

l1+l3=l2. После отрезания заготовки цикл повторяется.

Система циклового логического управления технологическим комплексом может быть построена на базе контактной



B



Рыс. 3. Принини работы системы позиционирования диста под икцукяколиным цодогревательным устройством:

6

а) титановый лист в положении резания, б) титановый лист

в положения подогрева.

релейной аппаратуры или с помощью бесконтактных логических схем. Если ограничиться ручным управлением, то целесообразно применять контактную релейную схему. При автоматическом управлении и в случае режима многократного резания с автоматическим выбором длины отрезаемых заготовок целесообразно применять схему логического управления на базе интегральных микросхем.

В последнем случае систему управления манипулятором можно будет легко привязать с гибкой производственной системой цеха.

T. Roosimaa, T. Lehtla

Control of the Titan Sheets Cutting Technological Cell

Abstract

The theoretical aspects of the titan sheets cutting technological cell control system are studied in this work. The automatic cutting process consists of the titan sheets heating with electrical inductor, sheets moving with manipulator and cutting. For the control of the technological cell the cyclic hard automatization is used here.
№ 627

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED TРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.318.38

В.Ф. Кескюла, А.О. Кильк, Э.Г. Кюльм

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАЗОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАСТОЧКЕ "ЯВНОПОЛЮСНОГО" ИНДУКЦИОННОГО ВРАЩАТЕЛЯ

Индуктор явнополюсного индукционного вращателя (в дальнейшем ИВЯ) имеет шесть зубцов, прикрепленных к ярму в виде выступающих полюсов, охватываемых катушками обмотки (рис. I). Питая эти катушки от сети трахфазного тока так, чтобы обмотки диаметрально противоположных зубцов были включены в одну и ту же фазу, образуя пару "фазных полюсов", получим в расточке ИВЯ двухполюсное вращающееся магнитное поле [I].

В [1] влияние пазов на распределение магнитного поля учитывается косвенно через коэффициент воздушного зазора к₃, а расчетный шаг обмотки принимается равным одной третьей полюсного деления. В настоящей работе делается попытка оценить влияние пазов на распределение магнитного поля в расточке ИВЯ.

Строгий учет влияния пазов с обмотками на распределение магнитного поля в немагнитном зазоре электрических машин представляет собой весьма трудную задачу и решается обычно в условиях сравнительно далеко идущей идеализации и упрощения. Таким же образом приходится поступать и в данной работе.

В [2] показано, что для определения основной гармоники магнитной индукции можно круговую расточку индукционного вращателя с радиусом r_c заменить эквивалентным плоским немагнитным зазором с шириной $\delta = r_c / \rho$ ($\rho = I$ – число пар полюсов результирующего магнитного поля). Учитывая это, можно влияние пазов на распределение основной гармоники магнитного поля в эквивалентном плоском немагнитном зазоре исследовать на базе упрощенной плоской модели, изображенной на



Рис. 1. Поперечное сечение ИВЯ.



Рис. 2. Расчетная модель с эквивалентным плоским немагнитным зазором.

рис. 2, к которой применим метод конформных отображений. В упрощенной расчетной модели, приведенной для исследования поля одного зубца, токи катушки в пазах заменены поверхностными токами, распределенными равномерно на боковых поверхностях пазов магнитопровода на участке шириной $h_{n1} = y_{k2} - y_{k1}$. При этом линейная плотность поверхностных токов равна

$$\sigma_{\kappa} = \frac{I_{\kappa}}{h_{m}}, \qquad (I)$$

где Ік - суммарный ток катушки в пазу.

Сложные границы боковых поверхностей зубцов в пазах на расчетной модели заменены простыми вертикальными поверхностями на уровне открытия паза. Как показывает анализ, такое упрощение мало сказывается на распределении магнитного поля в области немагнитного зазора вне паза.

Для решения поставленной задачи методом конформных отображений необходимо область немагнитного зазора с пазами отображать на верхней полуплоскости. Для упрощения этой задачи применим метод наложения, ограничиваясь в начале рассмотрением влияния только одного паза с током I_к, а для упрощения формул конформного отображения принимаем глубину паза равной бесконечности. В результате получим схему упрощенной расчетной модели, изображенной на рис. За.





Рис. 3. Конформное отображение области эквивалентного немагнитного зазора упрощенной расчетной модели на верхнюю полуплоскость.

Распределение магнитной индукции в плоскости немагнитного зазора с одним пазом. Рассматриваемая область расчетной модели с одним пазом на рис. За ограничивается ломаной линией $Z_1 - Z_2 - Z_3 - Z_4 - Z_5 - Z_1$ на комплексной плоскости Z = x + jy. Конформное отображение этой области на верхнюю полуплоскость w = u + jv (рис. 36) осуществляется функцией [3]

$$Z = j\delta \frac{2}{\pi} \left[\arctan \frac{2\delta}{b_n} \frac{w}{\sqrt{w^2 - a^2}} + \frac{b_n}{2\delta} \operatorname{arth} \frac{w}{\sqrt{w^2 - a^2}} \right], \quad (2)$$

где

$$a^{2} = 1 + \left(\frac{2\delta}{b_{n}}\right)^{2}$$
. (3)

При этом связь между точками оси × на фиг. За и точками оси ч верхней полуплоскости выражается формулой

$$x = \delta \frac{2}{\pi} \left[\operatorname{arth} \frac{2\delta}{b_n} \frac{u}{\sqrt{a^2 - u^2}} + \frac{b_n}{2\delta} \operatorname{arctg} \frac{u}{\sqrt{a^2 - u^2}} \right], \quad (4)$$

а связь между точками вертикальной поверхности паза ($\Xi = \frac{b_n}{2} + + jy$) и осью \cup верхней полуплоскости формулой

$$y = \delta \frac{2}{\pi} \left[\arctan \frac{2\delta}{b_n} \frac{u}{\sqrt{u^2 - a^2}} + \frac{b_n}{2\delta} \operatorname{arth} \frac{\sqrt{u^2 - a^2}}{u} \right].$$
 (5)

При равномерном распределении поверхностного тока в пазу расчетной модели можно считать, что поверхность магнитопровода в пределах координат $Z_1 = \infty + j\delta$ до $Z_{\kappa 1} = b_n/2 + jy_{\kappa 1}$ имеет постоянный скалярный магнитный потенциал $\bigcup_M = I_{\kappa}$, на участке паза с координатами от $Z_{\kappa 1} = b_n/2 + jy_{\kappa 1}$ до $Z_{\kappa 2} = b_n/2 + jy_{\kappa 2}$, где ток распределен равномерно, потенциал падает до нуля по линейному закону

$$U_{M}(y) = I_{K} \frac{y_{K2} - y}{y_{K2} - y_{K1}}.$$
 (6)

На остальных поверхностях магнитопровода расчетной модели потенциал U_w = 0.

Так как потенциалы точек поверхности магнитопровода, ограничивающие немагнитный зазор, при конформном отображении не изменяются, то через отображающую функцию (2) можно найти распределение скалярного магнитного потенциала также на оси U плоскости W, где точки $W_1 = I$, $W_2 = d$, $W_3 = \pm \infty$, $W_4 = -Q$ и $W_5 = -1$ соответствуют точкам Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 и Z_5 плоскости Z. При этом правый край магнитопровода с другим пазом и обратным током паза -I, удаленный в плоскости Z в бесконечность (Z = Z, =∞), переходит в плоскости W в точку w=w,=1, а соответствующий распределенный ток паза переходит в линейный ток -I_к в точке w,=1. Поверхностный ток рассматриваемого паза в плоскости w распределен на оси и между точками $W = U_{k1}$ и $W = U_{k2}$, соответствующими точкам $Z_{k1} =$ $= b_n/2 + jy_{k1}$ и $Z_{k2} = b_n/2 + jy_{k2}$ плоскости Z. Учитывая формулы (5) и (6), можно распределение скалярного магнитного потенциала на оси и между точками и и и и и определить выражением

$$U_{M}(u) = I_{K} \left[\frac{y_{K2}}{h_{n1}} - \frac{\delta}{h_{n1}} \frac{2}{\pi} \left(\arctan \frac{2\delta}{b_{n}} \frac{u}{\sqrt{u^{2} - a^{2}}} + \frac{b_{n}}{2\delta} \operatorname{arth} \frac{\sqrt{u^{2} - a^{2}}}{u} \right) \right].$$
(7)

На оси и между точками и = 1 и и = 0 к1 магнитный потенциал имеет постоянное значение $U_{M} = I_{K}$, между точками и = u_{K1} и и = u_{K2} магнитный потенциал падает до нуля, а на остальных участках оси и равен нулю. На рис. Зб приведен график распределения потенциала U_{M} по оси и (сплошная кривая), рассчитанный изложенным выше методом для случая, когда $y_{K1} = I,075$, $y_{K2} = I,215$ и $b_{D} = 0,635$.

Как показывает анализ формулы (7) и график $U_{M}(u)$ на рис. Зб, распределение $U_{M}(u)$ на участке $u_{k1} \cdots u_{k2}$ оси и с достаточной точностью можно аппроксимировать прямой линией (пунктирная линия на рис. Зб), описываемой формулой

$$U_{M}(u) = I_{K} \frac{u_{K2} - u}{\Delta u_{K}} , \qquad (8)$$

где AUK = UK2 - UK1 -

Используя интеграл Шварца для верхней полуплоскости [4] можно по распределению скалярного магнитного потенциала по оси и найти комплексный потенциал магнитного поля в плоскости w

$$W(w) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_{M}(\xi)}{\xi - w} d\xi + K , \qquad (9)$$

через который легко определить распределение магнитной индукции.

По аппроксимированному распределению U_M(u) на рис. Зб и по формулам (8) и (9)

$$W(w) = \frac{1}{\pi} \int_{1}^{u_{\kappa_{1}}} \frac{I_{\kappa}}{\xi - w} d\xi + \frac{1}{\pi} \int_{u_{\kappa_{1}}}^{u_{\kappa_{2}}} \frac{I_{\kappa}}{\Delta u_{\kappa}} \frac{(u_{\kappa_{2}} - \xi)}{(\xi - w)} d\xi =$$
$$= \frac{I_{\kappa}}{\pi} \left(\frac{u_{\kappa_{2}} - w}{\Delta u_{\kappa}} \ln \frac{u_{\kappa_{2}} - w}{u_{\kappa_{1}} - w} + \ln \frac{u_{\kappa_{1}} - w}{1 - w} - 1 \right) + K, \quad (I0)$$

где К - действительная постоянная.

Вектор магнитной индукции в плоскости w определяется по формуле

$$\tilde{B}_{w} = -j\mu_{o}\frac{dW(w)}{dw} = -j\mu_{o}\frac{I_{\kappa}}{\pi}\left(\frac{1}{1-\overline{w}} - \frac{1}{\Delta u_{\kappa}}\ln\frac{u_{\kappa2}-\overline{w}}{u_{\kappa1}-\overline{w}}\right), \quad (II)$$

где $\overline{w} = u - iv$ - сопряженная координата плоскости w.

Вектор магнитной индукции в плоскости z определяется через отображающую функцию

$$\tilde{B}_{z} = \tilde{B}_{w}\left(\frac{dw}{dz}\right) = \tilde{B}_{w}\left(-j\frac{\pi}{b_{n}}\frac{\overline{w}^{2}-1}{\sqrt{\overline{w}^{2}-q^{2}}}\right), \quad (I2)$$

или, с учетом (II)

$$\vec{B}_{z} = -j B_{p} \frac{\delta}{b_{n}} \frac{1 + \overline{w}}{\sqrt{a^{2} - \overline{w}^{2}}} \left(1 - \frac{1 - \overline{w}}{\Delta U_{K}} \ln \frac{U_{K2} - \overline{w}}{U_{K1} - \overline{w}} \right), \quad (I3)$$

где через

$$B_{\rm p} = \mu_0 \frac{I_{\rm K}}{\delta} \tag{14}$$

обозначена т.н. расчетное значение магнитной индукции, соответствующее однородному магнитному полю в зазоре,где пазы отсутствуют.

Если распределенный ток в пазу заменить линейным током $I_{\rm K}$, расположенным на поверхности паза на высоте $y_{\rm K} = (y_{\rm K1} + y_{\rm K2})/2$, то формула (I3) упрощается к виду

$$\tilde{B}'_{z} = -j B_{p} \frac{\delta}{b_{n}} \frac{1+\tilde{w}}{\sqrt{a^{2}-\tilde{w}^{2}}} \left(1 - \frac{1-\bar{w}}{u_{w}-\bar{w}}\right), \quad (I5)$$

где Цк соответствует координате Ук.

При $y_{\kappa} = \infty$, u_{κ} тоже равен бесконечности, и формула (15) принимает вид

$$\vec{B}_{z}'' = -j B_{p} \frac{\delta}{b_{n}} \frac{1+\overline{w}}{\sqrt{a^{2}-\overline{w}^{2}}}.$$
 (16)

На рис. 4 приведены кривые распределения относительной магнитной индукции $B = B_{\rm g}/B_{\rm p}$ на оси × в зоне паза эквивалентного немагнитного зазора. Кривые рассчитаны по формулам (13) и (4) для случая, когда $b_{\rm r} = 0,6285$, $y_{\rm k1} = 1,075$ при двух значениях ширины токового слоя в пазу. Для сравнения, пунктиром приведено распределение индукции, рассчитанной по формуле (16).

Распределение магнитной индукции в эквивалентном немагнитном зазоре при учете влияния двух пазов с токами.Магнитное поле в немагнитном зазоре расчетной модели определяется распределением скалярного магнитного потенциала на



Рис. 5. К методу наложения скалярных магнитных потенциалов.

границах немагнитного зазора. Для определения магнитного пояя в немагнитном зазоре в полосе $0 \le y \le \delta$ с учетом влияния двух пазов с токами (рис. 5а) используем метод наложения. Для этого заменим заданное на рис. 5а распределение потенциала тремя системами магнитных потенциалов, ограничивающих рассматриваемую область немагнитного зазора и изображенных на рис. 5 б.в.г. При сложении магнитных полей, создаваемых указанными системами магнитных потенциалов в полосе $0 \le y \le \delta$, получим разультирующее поле в рассматриваемой области зазора, соответствующее полю расчетной модели рис. 5а. Согласно этому магнитная индукция в рассматриваемой области определяется через сумму трех составляющих

где

$$\vec{B}_{z} = \vec{B}_{z1} + \vec{B}_{z2} + \vec{B}_{z3},$$
 (17)

1TMS

$$\tilde{B}_{\Xi1} = -j B_{\mu} \frac{\delta}{b_n} \frac{1 + \overline{w}_1}{\sqrt{a^2 - \overline{w}_1^2}} \left(1 - \frac{1 - \overline{w}_1}{\Delta u_\kappa} \ln \frac{u_{\kappa 2} - \overline{w}_1}{u_{\kappa 1} - \overline{w}_1} \right),$$
(I8)

$$\tilde{B}_{z2} = -j B_p \frac{\delta}{b_n} \frac{1 + \overline{w}_2}{\sqrt{\alpha^2 - \overline{w}_2^2}} \left(1 - \frac{1 - \overline{w}_2}{\Delta u_K} \ln \frac{u_{K2} - \overline{w}_2}{u_{K1} - \overline{w}_2} \right),$$
(19)

$$B_{z3} = j B_p$$
. (20)

В формулах (18) и (19) нужно принять $\overline{w}_1 = \overline{w}$ при $\kappa_1 = \chi$ и $\overline{w}_2 = w$ при $\kappa_2 = t_3 - \chi$.



Рис. 6. Распределение магнитной индукции на оси х эквивалентного немагнитного зазора.

На рис. 6 приведены кривые распределения на оси \times относительной магнитной индукции, рассчитанные по формулам (17)...(20) при относительном значении зубцового деления $t_3 = 1,047\delta$, $b_n/t_3 = 0,3$, $y_{k1} = 1,075$ и $y_{k2} = 1,21\delta$. Сплошной кривой приведено распределение результирующей магнитной индукции, а пунктирными – распределение составляющих магнитной индукции.

<u>Магнитный поток</u> одного зубца через немагнитный зазор при учете влияния обоих пазов с токами определяется формулой

$$\Phi_{3} = \int_{-\infty}^{\infty} (|B_{z_{1}}| + |B_{z_{2}}| - |B_{z_{3}}|) dx.$$
(21)

Учитывая симметрию распределения магнитной индукции относительно оси зубца (на рис. 6 проходит через точку $x_3 = t_3/2$) и взаимосвязь между B_{z1} и B_{z2} , можно выражение (21) записать в виде суммы двух интегралов

$$\Phi_{3} = 2 \int_{-\infty}^{\infty} |B_{z_{1}}| dx + 2 \int_{x_{3}}^{\infty} (|B_{z_{1}}| - B_{p}) dx.$$
 (22)

Учитывая выражения (IЗ) и (4), получим

$$\Phi_{3} = B_{p} 2 \frac{\delta}{\pi} \int_{-1}^{\infty} \left(\frac{1}{1-u} - \frac{1}{\Delta u_{k}} ln \frac{u_{k2}-u}{u_{k1}-u} \right) du - B_{p} 2 \int_{t_{3}/2}^{\infty} dx.$$
(23)

Интегрируя уравнение (23) и раскрывая неопределенности при ч = I и × =∞, получим для магнитного потока зубца формулу

$$\Phi_{3} = B_{p} \left\{ t_{3} - \delta \frac{2}{\pi} \left[\frac{b_{n}}{\delta} \arctan \frac{b_{n}}{2\delta} - 2\ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{n}}{2\delta}\right)^{2}} + \frac{1}{\Delta u_{\kappa}} \left(\ln \frac{u_{\kappa2}^{2} - 1}{u_{\kappa1}^{2} - 1} + u_{\kappa2} \ln \frac{u_{\kappa2} + 1}{u_{\kappa2} - 1} - \underbrace{u_{\kappa1} \ln \frac{u_{\kappa1} + 1}{u_{\kappa1} - 1}}_{c_{\kappa1} + 1} \right) \right] \right\},$$
(24)

или сокращенно

$$P_{3} = B_{p} \left[t_{3} - \delta(\gamma + \gamma_{i}) \right], \qquad (25)$$

где у - коэффициент, учитывающий уменьшение магнитного потока зубца от наличия пазов [4]

$$\chi = \frac{4}{\pi} \left[\frac{b_n}{2\delta} \arctan \frac{b_n}{2\delta} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_n}{2\delta}\right)^2} \right]; \quad (26)$$

$$I_{1} = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\Delta u_{k}} \left(\ln \frac{u_{k2}^{2} - 1}{u_{k1}^{2} - 1} + u_{k2} \ln \frac{u_{k2} + 1}{u_{k2}^{2} - 1} - u_{k1} \ln \frac{u_{k1} + 1}{u_{k1} - 1} \right).$$
(27)

При замене распределенного тока в пазу линейным током в точке с ординатой у_к на поверхности паза формула (27) упрощается к виду

$$\chi_{1}' = \frac{2}{\pi} \ln \frac{u_{k}+1}{u_{k}-1}$$
 (28)

При стремлении у_к к бесконечности коэффициент у₁' обращается в ноль.

В теории электрических машин влияние пазов на уменьшение магнитного потока зубцов через немагнитный зазор учитывается при помощи коэффициента воздушного зазора [4]

$$k_3 = \frac{1}{1 - \frac{\overline{b}}{\overline{t}_3} \chi}$$
 (29)

Учитывая формулы (26) и (29), можно магнитный поток зубца через немагнитный зазор с учетом влияния токов в пазах выражать в виде

$$\Phi_{3} = B_{p} t_{3} \left(1 - \frac{\delta}{t_{3}} \chi - \frac{\delta}{t_{3}} \chi_{1} \right) = \frac{B_{p}}{k_{3}} t_{3} k_{\phi}, \qquad (30)$$

где k_ф - коэффициент, учитывающий влияние координат тока в пазу

$$k_{\phi} = 1 - k_3 \frac{\delta}{t_3} \chi_1 \,. \tag{3I}$$

Численный анализ показывает, что для определения коэффициента k_{ϕ} можно использовать упрощенное выражение (28) вместо (27). Погрешность от такого упрощения не превышает 0,5 %.

Выражение (31) может быть использовано для определения расчетного шага обмотки ИВЯ. Поскольку расчетное значение магнитной индукции В_р пропорционально коэффициенту укорочения шага обмотки k_v

$$k_{y} = \sin\left(y_{p}^{\prime}\frac{\pi}{2}\right) = k_{\phi}\sin\left(\frac{t_{a}}{\tau}\frac{\pi}{2}\right), \qquad (32)$$

то относительный расчетный шаг обмотки определяется по формуле

$$y'_{p} = \frac{2}{\pi} \arcsin(k_{\phi} \sin \frac{t_{3}}{\tau} \frac{\pi}{2}),$$

(33)

где т - полюсное деление индуктора.

Приведенные выше формулы могут быть использованы также для расчета трехзубцовых индукционных перемешивателей (ИПЯ), где влияние токов в пазах более сильно сказывается на магнитный поток зубца. Такие ИПЯ могут рассматриваться как частный случай статора асинхронной машины, имеющего число пазов на полюс и фазу q = 0,5.



Рис. 7. Относительная магнитная индукция в зависимости от ширине открытия пазов с токами в центре расточки ИВЯ и ИПЯ.

Для проверки применимости полученных формул к расчету ИВЯ и ИПЯ на рис. 7 сопоставлены результаты расчетного и экспериментального определения относительной магнитной индукции $B_p^* = \frac{K_{\Phi}}{K_3}$ в центре расточки ИПЯ в зависимости от относительной ширины открытия паза $a_n = b_n/t_3$. Экспериментальные данные приведены в виде точек, полученных расчетом из экспериментов для четырех различных макетов ИПЯ. Кривая с q = I соответствует ИВЯ. Как видно, данные эксперимента и расчета хорошо совпадают, что позволяет использовать приведенные в настоящей работе формулы для расчета ИВЯ и ИПЯ.

Литература

I. Кескюла В.Ф., Ристхейн Э.М. Возможные системы магнитопровода и обмоток индукционных вращателей. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1965, № 231, с. 69-85.

2. Кескюла В.Ф. Исследование электромагнитных процессов в индукционных вращателях жидкого металла. Автореферат, Таллин, 1967.

З. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1965, 716 с.

4. Рихтер Р. Электрические машины, т. І. М., ОНТИ, 1935.

V. Keskula, A. Kilk, E. Kulm

The Influence of Slots on the Distribution of Magnetic Field in the Air-Gap of Salient Pole Induction Rotator

Abstract

The paper deals with the investigation of the distribution of magnetic field in the non-magnetic air-gap of an induction rotator with visible poles. The influence of currents in a slot has been taken into consideration. The approximate solution of the problem has been presented on the basis of the conformal transformation. The paper concludes with a comparison of calculated and experimental data. № 627

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.318.38

В.Ф. Кескюла, А.О. Кильк, Э.Г. Кюльм

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ "ЯВНОПОЛЮСНЫХ" ИНДУКЦИОННЫХ ВРАЩАТЕЛЕЙ

МГД-устройства с вращающимся магнитным полем широко используются в разных технологических процессах. Рассматриваемая в данной статье конструкция "явнополюсных" индукционных вращателей (в дальнейшем ИВЯ) применяется для МГД-воздействия на процесс выращивания монокристаллов из расплава полупроводников по методу Чохральского.

Для обеспечения необходимой магнитной индукции в зоне полупроводникового расплава требуемые линейные токовые нагрузки ИВЯ будут в 5...7 раз больше по сравнению с токовыми нагрузками обычных асинхронных двигателей [I]. Такие большие токовые нагрузки вызывают выделение в обмотках ИВЯ значительного количества тепла. Определенное количество тепла выделяется и за счет потерь в стали магнитопровода. Это вызывает необходимость применения системы принудительного (воздушного или водяного) охлаждения ИВЯ. Для проверки и уточнения такого напряженного теплового режима работы ИВЯ необходимо проводить аналитический контрольный тепловой расчет.

В настоящей работе приводится методика контрольного теплового расчета, которая выполняется в конечном этапе проектирования ИВЯ. Тепловым расчетом определяется степень нагрева обмотки и магнитопровода, а также уточняются потери мощности в индукторе в рабочем режиме. Тепловой расчет основывается на методе эквивалентной тепловой схемы замещения [2, 3]. Этой схемой рассматривается устройство в объеме одного полюсного деления (рис. I).

Определяющими узлами для схемы замещения являются элементы конструкции индуктора, в которых выделяются тепловые





Система уравнений

$$\begin{split} t_{I} & \left(G_{T4}^{+} G_{T4}^{+} G_{T4}^{+} G_{T6}^{+} + G_{T9}^{-} - \frac{P_{HUO}}{t_{H0}^{+} + 235} \right) - t_{2}^{+} G_{T9}^{-} - t_{3}^{+} G_{T6}^{-} - t_{4}^{+} G_{T4}^{-} - \\ - t_{7}^{+} G_{T4}^{-} - t_{9}^{+} G_{T3}^{-} - t_{9}^{+} G_{T4}^{-} - t_{9}^{-} G_{T3}^{-} - t_{9}^{-} G_{T4}^{-} + t_{10}^{-} G_{T4}^{-} - t_{10}^{-} + t_{10}^{-} G_{T4}^{-} + t_{10}^{-} H_{10}^{-} H_{10}^{-} + t_{10}^{-} H$$

потери мощности – медь в пазовой и лобовой части катушки обмотки и электротехническая сталь магнитопровода, а также элементы с охлаждающей средой – охлаждающая вода во внутренней и наружной рубашках устройства, а также охлаждающий воздух. Пути течения тепловых потоков между этими определяющими узлами заменены ветвями тепловой схемы замещения с соответствующими тепловыми проводимостями и с некоторыми промежуточными узлами (рис. 2).

Связи между температурами узлов, проводимостями ветвей и потерями в меди и в стали описываются системой из I2 уравнений с некоторыми нелинейными элементами (тепловые проводимости излучением), которая составлена по методу узловых температур (по аналогии с методом узловых потенциалов в электротехнике). В результате решения этой системы с помощью ЭЕМ методом постепенных приближений получаем температуры узлов схемы замещения, соответствующие средним температурам элементов реального устройства. На основе полученных средних температур и тепловых проводимостей уточняются потери мощности в меди обмотки и можно определить распределение тепловых потоков в индукторе.

В качестве примера в настоящей статье приведен формуляр контрольного теплового расчета для относительно короткой "явнополюсной" конструкции индукционного вращателя.

Формуляр контрольного теплового расчета

I. Исходные данные

| Величина | Обозна- чение | Числовое значение |
|------------------------------------|------------------|----------------------|
| ондачником зурда I Ав | 2 | 3 |
| I. Геометрические размеры, м | | |
| I. Диаметр расточки индуктора | Dc | 0,70 |
| 2. Наружный диаметр ярма индуктора | Dg | 0,91 |
| 3. Наружный диаметр внутренней | | |
| водяной рубашки (в дальнейшем | | |
| BPY) | Dan | 0,656 |
| 4. Ширина сердечника зубца | b3 | 0,100 |
| 5. Ширина боковой наклонной сто- | 0 | |
| роны наконечника зубца | a3 | 0,043 |

| 00 83 | нулы начовой и повосай и ада | 2 | 3 3 9 201 |
|-------|------------------------------------|---------------|----------------|
| 6. | Глубина паза индуктора | hn | 0,075 |
| 7. | Высота ярма индуктора | ha | 0,030 |
| 8. | Длина сердечника зубца | la | 0,15 |
| 9. | Длина ярма | la | 0.15 |
| I0. | Длина оболочки индуктора | LK | 0.304 |
| II. | Высота серцечника зубца | ha | 0.062 |
| 12. | Высота наружной боковой стороны | 9 | NULL CT CALLER |
| | обмотки | h | 0.044 |
| I3. | Ширина поперечного сечения од- | I NEOTO | NMRqpggn N |
| | ной стороны катушки | br | 0.066 |
| I4. | Ширина контакта наконечника | алучени | THE BOARDER |
| | зубна с катушкой обмотки | 6,00 | 0.057 |
| I5. | Расстояние между наконечниками | -3 | exercore |
| | двух соседних зубнов | bno | 0.092 |
| I6. | Зубновое деление | to | 0.367 |
| 17. | Толшина изоляционного зазора межлу | eq adres | турам элема |
| 100 | наконечником серлечника и ВРУ | Δ. | 0.022 |
| I8. | Толична боковой изоляции катушки | Δ. | 0.001 |
| | A REPORTED A REPORT OF A REP | a contrat | 0,001 |
| 19. | Толцина дополнительной изоляции | | |
| | обмотки в сторону сердечника | ٨ | 0.007 |
| ~~~ | зубца | 43 | 0,001 |
| 20. | Технологический зазор между изо- | | |
| | ляцией обмотки и наконечником | tur Gami | 4 |
| | зубца | Δ4 | 2.10-1 |
| 21. | Толщина дополнительной изоляции | | |
| | обмотки в сторону оболочки ин- | 63 K8 | - |
| 00 | дуктора | Δ_5 | 0,001 |
| 22. | Технологический зазор между изо- | + t_ 6 ;; | A |
| | ляцией обмотки и сердечником зубца | Δ6 | 2.10-1 |
| 23. | Технологический зазор между сер- | tulimenti | 5 |
| ~ | дечником зубца и ярмом индуктора | Δ_7 | 2.10-0 |
| 24. | Толщина дополнительной изоляции | | |
| | обмотки от торца сердечника зубца | MANT. CLA | 3 . Harrist |
| 05 | до катушки | Δ8 | 0,010 |
| 25. | Технологический зазор от торца | | |
| | сердечника зубца до изоляционного | uennen e | 10 7074 |
| 90 | СЛОЯ | Δ9 | 2.10-1 |
| 20. | голщина слоя изоляции от лобовой | NUMBER OF T | 0.007 |
| | части катушки в сторону оболочки | Δ_{10} | 100,0 |
| | индуктора | | |

| | 8 I I I 8 | 2 | 3 |
|-----------|---|-----------------|-------|
| 27. | Толщина слоя изоляции от лобовой части катушки обмотки в сторону | | |
| | ВРУ | Δ 11 | 0,001 |
| | 2. Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К | | |
| I. 2. | Боковой наружной изоляции катушки Слоя дополнительной изоляции ка- | λ_1 | 0,19 |
| | тушки | λ_2 | 0,13 |
| 3. | Технологического воздушного зазора | λ_3 | 0,03 |
| 4. 5. | Меди обмотки Электротехнической стели вдоль | λ4 | 380 |
| 6 | листа Электротехнической стали поперек | λ_5 | 20 |
| 7. | листа Дополнительного слоя изоляции от | λ_6 | 3,5 |
| | торца сердечника зубца до катушки | λ_7 | 0,2 |
| т | 3. Коэффициент теплоотдачи, Вт/м [~] ·К | | |
| 1. | от внутреннеи стороны ярма к | | 7 F |
| 2. | От внутренней стороны оболочки к | ~ K1 | 7,0 |
| 3. | воздуху От наружной поверхности лобовой | QK2 | 7,0 |
| 4. | части катушки к воздуху От наружной поверхности пазовой | or K3 | 8,0 |
| 6. | части катушки к воздуху От боковой поверхности пазовой | or K4 | 8,5 |
| 6. | части катушки к воздуху От боковой поверхности лобовой | ¢ K2 | 8,5 |
| | части к воздуху | d _{K6} | 8,0 |
| 7. | От внутренней поверхности лобовой | | |
| 8. | части катушки к воздуху От поверхности наконечника зубца | OLK7 | 9,0 |
| | к воздуху | dK8 | 10,5 |
| 9. I0. | От поверхности ВРУ к воздуху От поверхности водяной рубашки | ¢ K9 | 10,0 |
| | оболочки индуктора к охлаждающей воде | ¢ K10 | I300 |

| | C I I C I | 2 | 3 | |
|-----|---|---------|-----------|--|
| | 4. Приведенные степени черноты | 1 | | |
| I. | От наружной поверхности пазовой | | | |
| | части катушки в сторону ярма | ٤1 | 0,92 | |
| 2. | От наружной поверхности лобовой | | | |
| | части катушки в сторону оболочки | | | |
| | индуктора | 82 | 0,90 | |
| 3. | От внутренней поверхности лобовой | | | |
| 11 | части катушки в сторону ВРУ | ε3 | 0,90 | |
| 4. | От поверхности наконечника зубца | | | |
| - | в сторону ВРУ | ٤4 | 0,93 | |
| 5. | От боковой поверхности катушки | MINTER | Neus of | |
| ~ | в сторону ВРУ | £5 | 0,88 | |
| 6. | От боковой поверхности катушки в | | otour | |
| | сторону оболочки индуктора | 86 | 0,90 | |
| | 5. Угловые коэффициенты | | | |
| - | облучения [4] | | | |
| 1. | От ооковой поверхности пазовой | рлечниц | toms of | |
| 2 | части катушки в сторону ВРУ | φ1 | 0,12 | |
| 2. | От ооковой поверхности пазовой | | 0.00 | |
| 2 | части катушки в сторону ярма | 92 | 0,20 | |
| 5. | ОТ ООКОВОИ ПОВЕРХНОСТИ ЛОООВОИ | | O TE | |
| A | части катушки в сторону БРУ | 43 | 0,15 | |
| | изоти колитики в сторони оболонии | | | |
| | части катушки в сторону осолочки | (0) | 0.20 | |
| 5. | Roammuneum sanonueuna mente | 44 | 0,50 | |
| | поперечного сечения катилики | cD | 0.65 | |
| 6. | Число зубнов ("полосов") инлук- | TM | 0,00 | |
| | тора | ang los | 6 6 | |
| | 6 Novarune Manua and Br | e name | an wither | |
| - | D. MONOLING MOUNOCTN, DT | | | |
| 1. | Расчетные потери в меди обмотки | bougeod | | |
| 0 | при температуре Смо | PMO | 900 | |
| 2. | Расчетные потери в стали индук- | Non the | части ка | |
| | тора | Pco | 980 | |
| | 7. Исходные температуры, ^о С | | | |
| I.5 | Меди обмотки, начальная | tmo | I00 | |
| 2. | Охлаждающего воздуха, начальная | tra | 25 | |
| 3. | Воды в ВРУ | tu | 40 | |
| 4. | Воды в наружной водяной рубашке | tva | 40 | |
| | | | | |

| | Расчет параметров элементов тепловой схе | Mbi 3ameujei | INF | |
|-------|---|------------------|--|----------------------|
| .5.5 | Величина | Обозна- чение | формула расчета | Числовое значение |
| 8.1. | On name I is martin to the second with a second second second | 2 | 3000 | 4 |
| -1-8 | I. Площади теплообмена, м ² : | 040 | 4 71 762 08 | 82871 |
| I.I. | Между обмоткой и наконечником зубца в пазу | S1 | 2bkalc | 1410,0 |
| I.2. | Внутренней поверхности "усиков" наконечни- | 2 | dir naw px | |
| | ка зубца в сторону ВРУ | S2 | $(t_3 - b_{no} - b_3) l_c$ | 0,0263 |
| I.3. | Боковой и свободной внутренней поверхности | | And the second second | |
| | катушки в пазу | S ₃ | $2(h_{k}+b_{k}-b_{k3})(l_{c}+b_{k})$ | 0,0229 |
| I.4. | Наружной поверхности катушки в пазу | S4 | $2b_{k}(l_{c}+b_{k})$ | 0,0285 |
| I.5. | Внутренней боковой поверхности катушки в | • | LaTada | |
| | пазу (в контакте с сердечником зубца) | S5 | 2hklc | 0,0132 |
| I.6. | Поперечного сечения меди катушки обмотки | S ₆ | 4bkhkgm | 0,0076 |
| I.7. | Поперечного сечения "усика" наконечника | 97 | | |
| | зубца у основания "усика" | S ₇ | $2(h_n - h_3)l_c$ | 0,0039 |
| I.8. | Сечения сердечника зубца | S ₈ | balc | 0,0150 |
| I.9. | Ярма в пазовой части | Sg | $\left[\frac{(D_A-h_R)\pi}{z}-b_3\right]l_R$ | 0,054I |
| I.IO. | Сечения сердечника зубца в аксиальном | | | |
| | направлении | Sin | 2b ₃ hn | 0,0150 |
| I.II. | Внутренней (или наружной) поверхности ло- | 2 | a. I.I. (00 - 0') | |
| | бовой части катушки | Sti | $2b_{k}(2b_{k}+b_{3})$ | 0,0306 |

9I

| 2 | Propagati abita at Inter O O O · A O | 2 | 3 | 4 |
|-------|---|------------------------------------|---|--------|
| Bo | ковой поверхности добовой части катушки верхности ярма в пазу над обмоткой | S ₁₂ S ₁₃ | 2h _k (2b _k + b ₃) 2l _c (h ₃ -h _k)+2l _n \(h ₃ -h _k) ² +b ² _k | 0,0204 |
| He | ружной поверхности ВРУ в зоне сердечника бца | S ₁₄ | b ₃ le D _{an} De | 0,0141 |
| HE 33 | дружной поверхности ВРУ под "усиками" /бцов | S ₁₅ | (t ₃ -b ₃)t _с D _{ан} D | 0,0375 |
| Bc | оковой наклонной поверхности наконечника обца | S ₁₆ | 2a ₃ le | 0,0129 |
| Ha 30 | ружной поверхности оболочки индуктора в не зубца | S ₁₇ | Daπ L _k | 0,145 |
| B | утренней поверхности оболочки индуктора зоне лобовой части катушки | S ₁₈ | 2(b _k +h _g)(b ₃ +2b _k +2h _g) | 0,0561 |
| HE | ружной поверхности ВРУ в зоне лобовой ксти катушки | S ₁₉ | 4 <u>т D эн</u> b _к | 160'0 |
| N'E | Расчетные мощности, Вт: | | | |
| 00 | отери в меди в пазовои части катушки Мотки при температуре t _{мо} | Рмио | $P_{M0} \frac{l_{c+b_k}}{(l_{c+b_k}+2b_u)\overline{z}}$ | 85 |
| IIc | лтери в меди в лобовой части катушки и температуре t _{мо} | PMLO | $P_{M0} \frac{b_3 + b_k}{(l_c + b_3 + 2b_k)z}$ | 65 |
| По | тери в стали в зоне одного зубца | Р, | 2 3 2 2 | I63 |

| 4 | 5,30 | 1000 | 1/.8,0 | 0,0358 | 4,35 | 2,20 | 0,095 | 0,673 | 27,2 | I,99 | 6,68 |
|---|---|--|---|-------------------------|--|---|--|---|--|---|---|
| m | Asys + Verys | S. A. A.A. | $\overline{\Delta_2}\Lambda_2\Lambda_3 + \overline{\Delta_3}\Lambda_1\Lambda_3 + \overline{\Delta_4}\Lambda_1\Lambda_2$ | S2 A3 | S3A4 A2 | 542172 542172 | -242-54 54A3-2 h ₂ -h _K | S5A1A2A3 | -2/2/v3+ Δ3/v1/v3+ Δ6/v1/v2 Se/24-3 1 + h + h | 57 75.4 | озток; Se Ль: 2 - hз |
| 2 | arr D :: | (| Ч ¹¹ | G _{T2} | G _{T3} | G _{T4} | G _{TS} | G _{T6} | G _{T7} | G _{T8} | G _{T9} |
| Ι | 3. Тепловые проводимости теплопроводно- стью, Вт/к | От пазовой части катушки к наконечнику | зуоца Изоляционного зазора между BPУ и "уси- | ками" наконечника зубца | Изоляции боковой поверхности катушки в пазу | Изоляции наружной поверхности катушки в пазу | Воздушного зазора от наружной поверхно- сти катушки в пазу к ярму индуктора | От меди катушки в пазу к сердечнику. зубца | По меди катушки между пазовой и лобо- вой частями | Электротехнической стали между "усика- ми" и сердечником зубца | Электротехнической стали вдоль высоты сердечника зубца |
| | | 3.I. | 3.2. | | 3.3. | 3.4. | 3.5. | 3.6. | 3.7. | 3.8. | 3.9. |

| 4 | 4,04 | 0,0205 | 36,I | 0,206 | 0,0262 | 1610*0 | 2,36 | 3,88 | 2,36 |
|-----|---|---|---|---|--|--|---|--|---|
| 8 8 | S ₈ λ ₃ λ5 (0,5·h ₃ +h _a).λ ₂ +Δ ₃ λ ₆ | SBA3 | 5 <u>975</u> ha | S_{10} $0,25 \cdot 1_{0} + \Delta 8 + \Delta 2 + \Delta 2$ | $\frac{\chi_6}{8_{11}\lambda_3} \frac{\lambda_7}{\lambda_3} \frac{\lambda_4}{\lambda_4}$ $\frac{\kappa_1 + \Delta_1 - h_3}{\lambda_3}$ | Sti N3 h3+h9-hk | $\frac{S_{11}\lambda_1\lambda_2}{\Delta_2\lambda_2 + \Delta_{40}\lambda_1}$ | <u>S12 M</u> ∆2 | $\frac{S_{11}\mathcal{X}_1\mathcal{X}_2}{\Delta_2\mathcal{X}_2+\Delta_{11}\mathcal{X}_1}$ |
| 2 | G ₇₁₀ | G _{T11} | G _{T12} | G _{T13} | G _{T14} | G _{T15} | GTI6 | G _{T17} | G _{T18} |
| I | От центра сердечника зубца до оболочки индуктора | изоляционного зазора межцу ыги и сердеч- ником зубца | Через ярмо из паза до оболочки индукто- ра | От сердечника зубца к лобовой части катушки | Воздушного зазора между ВРУ и лобовой частью катушки | Воздушного зазора между наружной оболоч- кой и лобовой частью катушки | Изоляции лобовой части катушки к наруж- ной оболочке | Боковой изоляции лобовой части катушки | Внутреннего слоя изоляции лобовой части катушки к ВРУ |
| | 3,10. | 3.11. | 3.I2. | 3.I3. | 3.I4. | 3.I5. | 3.I6. | 3.I7. | 3.I8. |

| | I HAR BUILDER | 22 | 3 | 4 |
|--------|--|-----------------|------------|-------|
| . 2. 3 | 4. Тепловые проводимости конвекцией, Вт/к: | | | 1374 |
| 4.I. | От внутренней поверхности ярма над катуш- | | | |
| | кой в пазу | G _{K1} | 01 K1 S12 | 0,194 |
| 4.2. | От внутренней поверхности оболочки ин- | CC. NA | | |
| | дуктора в зоне лобовой части катушки | G _{K2} | 0 K2 S18 | 0,392 |
| 4.3. | От наружной поверхности лобовой части | | | |
| | катушки | G K3 | 04 K3 S 11 | 0,245 |
| 4.4. | От наружной поверхности пазовой части | | | |
| | катушки | G K4 | 0x k4 54 | 0,242 |
| 4.5. | От боковой поверхности пазовой части | | | |
| | катушки | GK5 | 04 K5 S3 | 0,195 |
| 4.6. | От боковой поверхности лобовой части | | | |
| | катушки | G K6 | 04 K6 S12 | 0,163 |
| 4.7. | От внутренней поверхности лобовой час- | | | |
| | ти катушки | G K7 | 0K K7 S4 | 0,276 |
| 4.8. | От поверхности наконечника зубца под | | ~ KID ~ U | |
| | сердечником зубца | G _{K8} | α K8 S8 | 0,158 |
| 4.9. | От поверхности "усиков" зубца в сторону | | | |
| | BPy | G K9 | 0K K 8 5 2 | 0,276 |
| 4.IO. | От поверхности ВРУ под сердечником | | | |
| | ayona | G K10 | 04 K9 5 14 | 0,I4I |
| 4.II. | От поверхности ВРУ в зоне "усиков" зубца | G K11 | 0 K9 5 15 | 0,375 |
| | | | | |

| | toxed two I is by a state where where where | 2 | 3 | 4 |
|-----|---|------------------|--|--------|
| E | поверхности ВРУ в зоне лобовой части | | | |
| as. | тушки | G _{K12} | 0 K9 S19 | 0,907 |
| E | боковой стороны наконечника зубца | G _{K13} | 04 K8 S16 | 0,135 |
| FI | поверхности наружной водяной рубаш- | en o | A1 N 82.28 | |
| 5 | к охлаждающей воде | G K14 | & K10 S17 | 188 |
| | Тепловые проводимости излучением, Вт/к | | | |
| Fre | наружной поверхности катушки в па- | | (+ +272) ⁴ (+ +272)4 | |
| 5 | к ярму индуктора | Gui | $S_{4} \cdot 5_{7} 7 \cdot 8_{1} \frac{v_{7} \cdot c_{1} \cdot j_{7} - v_{14} \cdot c_{1} \cdot j_{7}}{(t_{7} - t_{41}) \cdot 10^{8}}$ | 0,260 |
| 54 | наружной поверхности лобовой части | | (+ | |
| m | тушки к оболочке | Guz | S ₄ 5,77 E ₂ (t ₈ - t ₁₂) · 10 ⁸ | 0,276 |
| FI | внутренней поверхности лобовой час- | 1001 | $(t_{-+273})^4$ $(t_{-+273})^4$ | 1610,0 |
| Z | катушки к ВРУ | G _{M3} | S ₄ :5,77 E ₃ (t ₆ -t _{v1}).10 ⁸ | 0,271 |
| 5 | поверхности наконечника зубца под | | 4 + 27214 + + 27214 | |
| 0 | рдечником к ВРУ | Gu4 | $S_8.5,77 \epsilon_4 \frac{(15+21)(14+21)}{(15-10)}$ | 0,130 |
| 5 | поверхности "усиков" зубца к ВРУ | Gus | S.,5,77 E. (t4+273)4 (ty+ 273)4 | 0,224 |
| | | | -1 $(t_4 - t_{v_1}) \cdot 10^{-2}$ | |
| E | боковой поверхности пазовой части | | 4 | |
| 30 | гушки к ВРУ | G _{N6} | $S_3 q_{15}, 7, 5_5 (10^{+} + 2/3) - (10^{+} + 2/3)$ | 0,024I |
| | | | ella far | |

| 4 | 0,0415 | 0,0275 | 0,0566 | | 68,6 | 77,8 | 53,2 | 50,3 | 4I,0 |
|---|---|---|--|--|---|---|--|--|---|
| 3 | S_3 , φ_2 , $5,77$, ε_6 , $(t_9+273)^4$, $(t_{14}+273)^4$, (t_9-t_{14}) , 10^8 | $S_{42}, \phi_3, 5, 77, \epsilon_5 \frac{(t_{10}+273)^4_{-} (t_{1\gamma_1}+273)^4}{(t_{10}-t_{1\gamma_1})\cdot 10^8}$ | S_{12} , q_4 , $5,77$, $E_6 \frac{(t_{10}+273)^4}{(t_{10}-t_{12})\cdot 10^8}$ | | 0,33 (2.t ₁₁ + t ₇) | 0,5 (t ₈ + t ₁₂) 0,25 (3.t _{q0} + t ₉) | 0,33 (2. t _{go} + t ₁₀) | 0,33(2.t ₆₀ + t ₆) | 0,25(3.t ₆₀ + t ₅) |
| 2 | G _{M7} | Gus | Gиg | | t _{G1} | t _{G2} t _{G3} | t ₆₄ | t _{g5} | tge |
| I | От боковой поверхности пазово <u>й</u> части катушки к ярму | От боковой поверхности лобовой части катушки к ВРУ | От боковой поверхности лобовой части катушки к оболочке индуктора | 6. Расчетные температуры охлаждающего воздуха, ^о С | В зазоре между катушкой и ярмом ин- дуктора в пазу В оссосо компо соботой тости исловии | и наружной оболочкой В зазоре между двумя катушками в пазу | В зоне боковой поверхности лобовой части катушки В зазоре между ВРУ и лобовой частью | катушки В зазоре между наконечником зубца и | ВРУ (в зоне сердечника) |
| | 5.7. | 5.8. | 5.9. | | 6.I. | 6.3. | 6.4. 6.5. | 6.6. | |

| | the second s | 0 | 4 |
|--|--|---|-------|
| В заворе между "усиками" наконечника зубца и ВРУ | t ₆₇ | $0,25(3\cdot t_{sn}+t_{k})$ | 40. |
| 7. Потери мощности в индукторе, Вг | | (13 (S. 4 + 4.) | 23, 2 |
| В меди катушки в пазу при температуре t ₁ | d. Dř | Pmuo t1+235 | 87 |
| В меди лобовой части жатушки при температуре t ₂ | d. | $P_{\rm M10} = \frac{t_2 + 235}{t_2 + 235}$ | 89 |
| Сумиарные потери в меди | Ĕ | (P _{M0} + 235) | 930 |
| Суммарные потери индуктора | Pr | P _M + P _{co} | 191(|

3. Температуры, определенные расчетом, ^оС

| | Величина | Обозна- чение | Числовое значение |
|-----|-----------------------------------|------------------|----------------------|
| I. | Средняя температура меди обмотки | 1 | |
| 2 | B Hasy | ۴1 | 112 |
| 2. | обмотки | to | TTS |
| 3. | То же. электротехнической стали | - 2 | |
| - | сердечника зубца | t ₃ | 90 |
| 4. | То же, поверхности "усиков" зубца | t4 | 86 |
| 5. | То же, поверхности наконечника | NORMA BAR | |
| | зубца под сердечником | t ₅ | 89 |
| 6. | Температура внутренней поверхно- | 0a (2).41 | |
| | сти лобовой части катушки | t ₆ | 100 |
| 7. | То же, поверхности пазовой части | | TOT |
| 0 | катушки со стороны ярма. | 17 | 101 |
| 0. | то же, поверхности лооовои части | t. | TOA |
| 9 | То же боковой поветуности ка- | 8 | 10-5 |
| | TVERN B DASV | to | 104 |
| I0. | То же, боковой поверхности лобо- | | S., BERGES |
| | вой части катушки | t 10 | 109 |
| II. | Средняя температура ярма индукто- | 10 | |
| | pa | t 11 | 52 |
| 12. | То же, оболочки индуктора | t 12 | 51 |

Для проверки справедливости приведенной выше методики теплового расчета было проведено экспериментальное исследование теплового режима ИВЯ. При номинальном режиме питания, соответствующем исходным данным приведенного формуляра контрольного теплового расчета, были сняты кривые изменения температур внутренней поверхности лобовой части катушки обмотки и повержности "усиков" зубца в зависимости от времени нагрева устройства. В установившемся режиме эти температуры достигли числовых значений соответственно IOI и 89 °C, что относительно хорошо совпадает с расчетными температурами по настоящему формуляру $t_6 = 100$ °C и $t_4 = 86$ °C. I. Кескюла В.Ф. Об особенностях электромагнитного расчета индукционных врадателей. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1967, № 249, с. 55-66.

2. Борисенко А.И., Костинов П.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 297 с.

З. Кильк А.О. О методиках теплового расчета индукционных МГД-устройств. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1978, № 456, с. 55-65.

4. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. М.: Госэнергоиздат, 1959, с. 414.

V. Keskula, A. Kilk, E. Kulm

Heat Calculation of Induction Rotators with Visible Poles

Abstract

The paper deals with the distribution of the thermal field in the induction rotators with visible poles. The method of joint temperatures for the equivalent thermal circuits has been used. An example of heat calculation analysis for the induction MHD-device with visible poles is given. № 627

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

> удк 621.313.333.001.24 Э.М. Ристхейн

К МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ДВИГАТЕЛЯ

В [1] было показано, что механическая характеристика реального асинхронного короткозамкнутого двигателя может выражаться традиционной формулой Клосса [2]

$$M = \frac{2M_{K}(1+\epsilon)}{\frac{S}{S_{K}} + \frac{S_{K}}{S} + 2\epsilon},$$
 (I)

(M - вращающий момент, M_K - его максимальное (критическое)значение, S - скольжение, S_K - критическое скольжение, E постоянная, зависящая от соотношения сопротивлений статораи ротора), если вместо критического скольжения S_K использовать переменную S'_K, зависящую от скольжения S. Физическиэтим учитывается рост активного сопротивления ротора сувеличением скольжения, вызывающий увеличение критическогоскольжения подобно случаю, когда в цепь ротора вводитсядополнительное (регулировочное) сопротивление (рис. I,a).





Была предложена формула

S'_ = C\$,

где

C

=
$$f(s, s_{\kappa}, M_{\kappa}/M_{HOM}, M_{M}/M_{HOM}, M_{\Pi}/M_{HOM})$$
 (3)

(2)

(M_{ном} - номинальный, M_п - пусковой, M_м - минимальные вращающие моменты двигателя).

Полученные по этому способу расчетные характеристики двигателей серии 4A⁺ с высотой вала более IOO мм оказались весьма близкими к фактическим. Однако при меньших двигателях расхождения увеличивались, а для двигателей с повышенным пусковым моментом, особенно при M_П > M_к, метод оказался неприменимым. Выявилось также смещение расчетного минимума характеристики в сторону меньших скольжений и некоторые усложнения при программировании процедуры нахождения коэффициентов зависимости (3). Для устранения этих недостатков имеется, в принципе, две возможности:

I) считать переменной величиной, кроме критического скольжения, также критический вращающий момент M_к и разработать соответствующие формулы;

2) заменить формулу (I) другим, более гибким выражением.

В настоящей статье рассматривается вторая из этих возможностей.

Учитывая, что асинхронные короткозамкнутые двигатели часто имеют ротор с двойной беличьей клеткой, можно представить вращающий момент двигателя в виде суммы двух слагающих

$$M = M_1 + M_2$$
, (4)

первая из которых выражается формулой Клосса (I)

$$M_{1} = \frac{2M_{K1}(1+\epsilon)}{\frac{S}{S_{K1}} + \frac{S_{K1}}{S} + 2\epsilon},$$
 (5)

а для второй может применяться упрощенное выражение

$$M_{2} = \frac{2M_{K2}}{\frac{S}{S_{K2}} + \frac{S_{K2}}{S}}.$$
 (6)

⁺ Расчеты для 274 типоразмеров этой серии провел на ЭЕМ студент С. Кольк.

"Частные" критические моменты M_{k1} и M_{k2} , критические скольжения S_{k1} и S_{k2} , а также коэффициент є должны выбираться так, чтобы получаемая после суммирования жарактеристика (см. рис. I,б) проходила через заданные точки (S_{HOM} , M_{HOM}), (S_{k} , M_{k}), (S_{m} , M_{m}) и (I, M_{m}).

Задача определения 5 коэффициентов формул (5) и (6) по 4 заданным точкам (s, M) аналитически не решается. Поэтому должна использоваться некоторая процедура постепенных приближений, например, следующая:

I) определяется первое приближение коэффициента є, используя формулу (I): Show Sk Mk

$$\varepsilon = \frac{\frac{SHOM}{S_{\rm K}} + \frac{S_{\rm K}}{S_{\rm HOM}} - 2\frac{M_{\rm K}}{M_{\rm HOM}}}{2\left(\frac{M_{\rm K}}{M_{\rm HOM}} - 1\right)};$$
 (7)

если из-за неточности каталожных данных эта формула дает $\varepsilon < 0$, что не согласуется с физическими представлениями о положительности активных сопротивлений двигателя, то следует проверить отношение $s_{\mu}/s_{\text{ном}}$; часто в таких случаях можно принять $\varepsilon = 0$;

2) на основании структуры формулы (4) (см. рис. I,б), в качестве первого приближения величины S_{к1} выбирают

$$s_{\kappa_1} \approx (0, 8 \dots 0, 9) s_{\kappa};$$
 (8)

3) первое приближение величины S_{K2} выбирают в зоне известного или предполагаемого второго максимума механической характеристики; у обыкновенных короткозамкнутых двигателей (без повышенных скольжения или пускового момента) можно предполагать

$$1,2 \le 5_{\kappa 2} \le 1,8;$$
 (9)

4) вычисляются критические моменты M_{к1} и M_{к2}, используя систему линейных уравнений

$$\begin{array}{c} a_{11} M_{\kappa 1} + a_{12} M_{\kappa 2} = M_{\kappa} \\ a_{21} M_{\kappa 1} + a_{22} M_{\kappa 2} = M_{\pi} \end{array} \right\} , \qquad (10)$$

$$d_{11} = \frac{2(1+\epsilon)}{\frac{S_{K1}}{S_{K1}} + \frac{S_{K1}}{S_{K}} + 2\epsilon}$$

$$d_{12} = \frac{2}{\frac{S_{K2}}{S_{K2}} + \frac{S_{K2}}{S_{K}}}$$

$$d_{21} = \frac{2(1+\epsilon)}{\frac{1}{S_{K1}} + S_{K1} + 2\epsilon}$$

$$d_{22} = \frac{2}{\frac{1}{S_{K2}} + S_{K2}}$$

5) по полученным в п. I...4 значениям ε , s_{k1} , s_{k2} , M_{k1} и M_{k2} вычисляют координаты максимума и минимума функции M = f(s) и сравнивают их с каталожными данными; в случае неудовлетворительного совпадения выбирают новые, уточненные значения s_{k1} и s_{k2} и повторяют п. 4 и 5 до приемлемого совпадения значениями;

6) проверяют вращающий момент по полученной характеристике при $S = S_{HOM}$ (т.е., в номинальном режиме); в случае неудовлетворительного совпадения с номинальным моментом (например, при расхождении более 5 %) выбирают новое, уточненное значение ε и повторяют шаги 4...6 до получения приемлемого совпадения. При желании шаги 5 и 6 могут быть совмещены.

Вышеописанная процедура легко программируется и получение коэффициентов формул (5) и (6) на ЭВМ любого типа, включая настольные (персональные) и карманные ЭЕМ, не вызывает затруднений. Программы настолько просты, что могут использоваться даже программируемые микрокалькуляторы с объемом программного регистра порядка 200 строк.

Практическая проверка такого способа выражения механической характеристики на двигателях серии 4А показала, однако, что иногда, при относительно глубоком минимуме фактической характеристики (например, при двигателях малой мощности) невозможно добиться прохождения получаемой характеристики через заданный минимум (s_M, M_M). В таком случае формула (4) может дополняться третьей слагающей, после чего она приобретает вид

$$M = M_1 + M_2 - m.$$
 (12)

Наиболее простым выражением слагающей т представляется двухчленная экспоненциальная функция

$$m = m_0 \left[k e^{-x} - (k-1) e^{-\frac{\kappa}{k-1}x} \right]$$
(I3)

(рис. 2), где

$$\begin{array}{c} m_{0} \approx M(s_{M}) - M_{M} \\ \chi = \frac{\alpha |s - s_{M}|}{1 - s_{M}} \end{array} \right\} .$$
 (I4)



Рис. 2. К формуле поправки m = f(x).

В формулах (ІЗ) и (І4)

- M(S_M) вращающий момент по формуле (4) при скольжении S_M;
 - с коэффициент, определяющий "узость" зоны действия поправки (I3); по имеющемуся опыту можно рекомендовать а = 2...3;
 - k коэффициент, определяющий "пологость" минимума; проще всего выбрать для k какое-либо целое положительное число, например 2 или 3; в любом случае k > I.

Возможны и другие способы коррекции, например,

$$M = M_1 + (1 - q_1) M_2, \qquad (I5)$$

где поправочный коэффициент q = f(s) может выражаться аналогично формулам (I3) и (I4). Такой коррекцией можно относительно легко добиться прохождения расчетной характеристики через точку (s_м, M_м), причем ранее определенные расчетные значения критического и пускового моментов практически не изменяются.



ристика двигателя 4А355М4 (315 кВт), полученная по формулам (4)...(6). Точками и горизоитальной линшей показаны номинальные и справочные данные по[3]. 4. Расчетная механическая характеристика двигателя КМR 160 М4 (18,5 кВт,ГДР). Точками показаны номинальные и справочные данные по [4] и [5].

На рис. З представлена полученная рассмотренным методом механическая характеристика четырехполюсного двигателя 4A355M4 (315 кВт); в качестве коэффициентов формул (5) и (6) получены $\varepsilon = 0,13$, $s_{\kappa 1} = 0,04$, $s_{\kappa 2} = 1,5$, $M_{\kappa 1} = 1,94$ М_{ном} $M_{\kappa 2} = 1,13$ М_{ном}; корректировка по (12) не использована (m = 0). Точками и горизонтальной линией показаны номинальные и справочные значения по [3]: $s_{\text{ном}} = 0,01$, $s_{\kappa} = 0,04$, $M_{\kappa} = 2,0$ М_{ном}, $M_{\rm M} = 0,9$ М_{ном}, $M_{\Pi} = 1,2$ М_{ном}

На рис. 4 представлена полученная таким же путем расчетная характеристика двигателя HMR 160 M4 (18,5 кВт, ГДР). Коэффициенты формул (5), (6), (13) и (14) равны: $\varepsilon = 0,40$, $\mathfrak{s}_{\mathsf{K1}} = 0,16$, $\mathfrak{s}_{\mathsf{K2}} = 2$, $\mathsf{M}_{\mathsf{K1}} = 2,16$ $\mathsf{M}_{\mathsf{HOM}}$, $\mathsf{M}_{\mathsf{K2}} = 1,92$ $\mathsf{M}_{\mathsf{HOM}}$, $\mathsf{m}_{0^{=}} 0,63$ $\mathsf{M}_{\mathsf{HOM}}$, $\mathsf{q} = \mathsf{k} = 3$. Номинальные и справочные данные по [4] и [5], представленные на рис. 4 в виде точек, равны: $\mathfrak{S}_{\mathsf{HOM}} = 0,03$, $\mathfrak{S}_{\mathsf{K}} = 0,20$, $\mathfrak{S}_{\mathsf{M}} = 0,8$, $\mathsf{M}_{\mathsf{K}} = 2,5$ $\mathsf{M}_{\mathsf{HOM}}$, $\mathsf{M}_{\mathsf{M}} = 1,7$ M_{M} , $\mathsf{M}_{\mathsf{M}} = 2,3$ $\mathsf{M}_{\mathsf{HOM}}$.

Рис. 3 и 4 показывают, что рассмотренная методика позволяет получить хорошо подогнанные к справочным данным и при этом достаточно простые математические выражения механических характеристик реальных короткозамкнутых асинхронных двигателей. Расчеты электромеханических переходных про-
цессов асинхронных электроприводов, с использованием выражений (4) или (12) могут проводиться практически на любых программируемых вычислительных средствах, включая программируемые микрокалькуляторы.

Если механическая характеристика интерпретируется формулой (I2), то критическое скольжение $S_{\kappa 2}$ может быть выбрано так, чтобы характеристика проходила через еще одну заданную точку – через точку противовключения (2, M_p), если, конечно, вращающий момент реверсирования M_p известен. Подгонка по минимальному моменту M_m производится в таком случае при помощи формул (I2)...(I4).

Получаемые характеристики могут использоваться и при s > 2; при s - ∞ вращающий момент, как это и должно быть, стремится к нулю.

<u>Вывод.</u> Представление механических характеристик реальных асинхронных двигателей в виде суммы двух составляющих, каждая из которых выражается формулой Клосса, позволяет при помощи ЭЕМ любого типа легко находить коэффициенты этих формул. Характеристики по своей форме весьма близки к опытным и при введении третьей, поправочной слагающей могут проходить через 4 заданные точки. Математическая интерпретация характеристик настолько проста, что для расчета электромеханических переходных процессов асинхронных электроприводов могут использоваться не только ЭЕМ, но и программируемые микрокалькуляторы.

Литература

I. Ристхейн Э.М. О формуле механической характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя. - Тр. Таллинск. политехн. ин-та, № 589, 1984. - С. 37-47.

2. Kloβ M. Drehmoment und Schlüpfung des Drehstrommotors. - Archiv für Elektrotechnik, 1916, <u>5</u>, H.3, S. 59-87.

 Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник. - М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.

4. VEM-Standardmotoren der Reihe "KMR" mit Käfigläufer, 5,5-160 kW, Schutzgrad IP 44. - 24 S.

5. Projektierungs-Anleitung für VEM-Drehstrom-Asynchron-Standardmotoren im Leistungsbereich 5,5-132 kW. - VEB Elektromotorenwerk Wernigerode, 1974. - 156 S.

E. Risthein

Zur mathematischen Interpretation der Drehmomentkennlinie des Käfigläuferasynchronmotors

Zusammenfassung

Für rechnergestützte Vorausberechnung der Hochlauf-, Brems- und Umschaltvorgänge in elektrischen Asynchronantrieben werden zwei Konzepte der mathematischen Interpretation von Drehmomentkennlinie des Käfigläuferasynchronmotors kritisch betrachtet:

1) die klassische Formel $M = 2 M_k (1 + \epsilon)/(s/s_k + s_k/s + 2\epsilon)$, wobei aber das Kippmoment M_k und der Kippschlupf s_k als schlupfabhängige Variablen eingeführt werden müssen;

2) eine Spaltung der Kennlinie in Form M = M₁ + M₂, wobei die beiden Teilmomente durch die obenerwähnte klassische Formel ausgedrückt werden können. Die Koeffizienten der Formelsätze werden aufgrund der Angaben über Nenn-, Kipp-, Anzugs- und Sattelmomente sowie der entsprechenden Schlupfwerte bestimmt. Konzept 2 wird dank leichterer Programmgestaltung und größerer Anpassungsfähigkeit als vorteilhafter eingeschätzt.





. Цена 80 коп.