ISSN 0013-5860

Электротехника

6 2006

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ЭТ Электротехника

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ —
КОЛЛЕКТИВНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ
Издаётся с января 1930 года

МЕДАЛЬ
"ЗА ЗАСЛУГИ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ"

УЧРЕДИТЕЛИ

ДЕПАРТАМЕНТ МАШИНОСТРОЕНИЯ МИНПРОМА РФ (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ» (г. САРАНСК)
АООТ «ХОЛДИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «ЭЛЕКТРОЗАВОД» (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОНИКА» (г. ВОРОНЕЖ)
АО «ВЭлНИИ» (г. НОВОЧЕРКАССК)
АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ (г. МОСКВА)
АССОЦИАЦИЯ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)
НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО» (г. МОСКВА)
АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

ЧИБИРКИН В.В., МАКАРЕВИЧ Л.В., МЕЩЕРЯКОВ В.М., НАЙМУШИН В.Г.,
КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета), ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛОВАЦКИЙ А.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**
АНОШИН О.А., БЕЛКИН Г.С., БРЯНЦЕВ А.М., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., ДОЛКАРТ В.М., ЕВСЕЕВ Ю.А.,
ИНЬКОВ Ю.М., КОЗЯРУК А.Е., КОПЫЛОВ И.П., ЛАЗАРЕВ Г.Б., ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У.,
МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А., РОЗАНОВ Ю.К., СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного редактора),
ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б., ФИНКЕЛЬ Э.Э.

Содержание журнала можно бесплатно получить в INTERNET через службу ИНФОМАГ, организованную в Московском физико-техническом институте. Адрес сайта: **http://www.infomag.ru**

Подписаться на журнал можно в почтовых отделениях связи по объединённому каталогу Департамента почтовой связи. Подписной индекс – 71111.
В редакции можно подписаться на журнал с любого месяца и приобрести отдельные номера за прошлые и нынешний годы.

Журнал переводится на английский язык в полном объёме и выходит в США в издательстве "ALLERTON PRESS, INC" (18 West 27th Street New York N.Y. 10001).

При перепечатке ссылка на журнал «Электротехника» обязательна.
Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.
За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несёт.
Рукописи статей не возвращаются.

Издатель: ЗАО "Знак" 101000, Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Адрес редакции: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12. Телефон/факс: (495) **361-95-96**
E-mail elektrotechnika@mtu-net.ru

Редактор отдела О.В. Кунавина.
Научный редактор Л.А. Романова.
Редактор З.П. Фёдорова

Сдано в набор 17.04.2006. Подписано в печать 16.05.2006. Формат 60×88 1/8
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 128.
Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный № 01330.

Макет выполнен и отпечатан в ОАО «Электропривод»
107078, Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, стр. 5

© «Электротехника», 2006 г.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

№ 6 ИЮНЬ 2006

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Поздеев Д.А., Ерезеев А.Н., Яковлев О.Г., Котельников О.В. Автоматизированная система плавного пуска высоковольтных двигателей магистральных насосов нефтепровода "Дружба" ОАО "Транснефть" 2

Шымчак П. Применение линейных электродвигателей для установок колебательного движения 10

СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ

Бороденко В.А. Реализация последовательностных логических функций на элементах программируемой логики 14

Росляков А.А. Применение компьютерных сетевых средств для построения систем управления технологическими объектами 22

ИЗОЛЯЦИЯ

Марфин Н.И. Исследование свойств полиэтилена в условиях атмосферного старения 27

Аракелян В.Г. Химия, механизмы и кинетика старения электроизоляционных целлюлозных материалов. Ч.I. Химия, механизмы и кинетика разложения целлюлозы 29

Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Михайлов И.Г., Онищенко Л.И., Фещук Т.А. Исследование зависимости ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с плёночным диэлектриком от режимов эксплуатации 38

Мазуров В.Л., Якимец П.П. Выбор технологии пропитки обмоток электродвигателей 41

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЁТЫ

Мамедов Ф.И., Дадашева Р.Б., Гусейнов Р.А. Исследование дифференциального электромагнитного датчика со сплошным магнитопроводом в нагрузочном режиме 45

Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш. Диагностика локационным методом состояния электрических кабельных линий при их прожиге 50

Острейко В.Н., Афанасьевский В.Е., Колмаков А.В., Малков А.С., Яковлев Г.В. Экспериментально-теоретический метод оценки способности разъединителей отключать ток холостого хода трансформаторов 58

Артём Эмануилович Кравчик 63

Исаак Яковлевич Браславский 65

CONTENTS

ELECTROPRIVOD

Pozdeev D.A., Erezeev A.N., Yakovlev O.G., Kotelnikov O.V. Automatic system of the fluent starting the high-tension engines main pump oil pipeline "Friendship" J.-S.Co "Transnefti" 2

Shymchak P. Application of linear electric motors for installations of oscillatory movement 10

MEANS OF CONTROL

Borodenko V.A. Realization of sequential logic functions on programmable logic elements 14

Roslyakov A.A. Using of computer-aided network for technological objects control systems building 22

ISOLATION

Marfin N.I. Investigation properties of polyethelene of atmospheric aging in conducted 27

Arakelyan V.G. Chemistry, mechanisms and kinetics of the diligence electroizolation cellulose material. P.I. Chemistry, mechanisms and kinetics of the decomposition of the cellulose 29

Grebennikov I.Yu., Gunko V.I., Dmitrishin I.G., Mikhailov I.G., Onischenko L.I., Feshyk T.A.. Research of dependence of a resource of high-voltage pulse condensers with film dielectric from modes of exploitation 38

Mazurov V.L., Yakimets P.P. Choice of technology of impregnation of windings of electric motors 41

RESEARCHES AND CALCULATIONS

Mamedov F.I., Dadasheva R.B., Guseynov R.A. The investigation of the differential electromagnetic sensor with utter magnetic circuit in the loading mode 45

Minullin R.G., Fardiev I.Sh. Diagnostics location probing of electric power lines before and after burning 50

Ostreiko V.N., Afanasievsky V.E., Kolmakov A.V., Malkov A.S., Jakovlev G.V. Experimental-theoretical method of the disconnector ability estimation to switch off the no-load current of the transformers 58

Artyom Emanuilovich Kravchik 63

Isaak Yakovlevich Braslavskiy 65

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Автоматизированная система плавного пуска высоковольтных двигателей магистральных насосов нефтепровода "Дружба" ОАО "Транснефть"

ПОЗДЕЕВ Д.А., ЕРЕЗЕЕВ А.Н., ЯКОВЛЕВ О.Г., КОТЕЛЬНИКОВ О.В.

В настоящее время на большинстве нефтеперекачивающих станций (НПС) магистральных нефтепроводов РФ системы управления электродвигателями насосных агрегатов осуществляют их пуск путём прямого подключения к сети. Такой способ пуска, оправданный в период проектирования и строительства НПС, когда отсутствовали альтернативные решения плавного пуска и останова, имеет, однако, ряд существенных недостатков, связанных с его нежелательным воздействием на:

1. *Двигатель*

Пиковые броски тока в переходном процессе прямого пуска (6–7-кратные по отношению к номинальному) приводят к значительным усилиям на проводники, расположенные в лобовых частях обмотки электродвигателя, и, как следствие, к ослаблению бандажирования обмотки, постепенному нарушению изоляции и преждевременному выходу двигателя из строя по причине КЗ витков обмотки.

2. *Исполнительный механизм*

Пиковые моменты переменного знака, развиваемые двигателем при пуске (4–5-кратные по отношению к номинальному) приводят к повышенным нагрузкам на подшипники и сам исполнительный механизм, постепенному увеличению зазоров в механических соединениях между двигателем и механизмом, сокращая межремонтный интервал.

3. *Технологический процесс*

Гидравлические удары, возникающие в трубопроводах при отключении двигателя от сети, создают дополнительные нагрузки на трубы, соединительные муфты, фланцы, уплотнения и другие монтажные конструкции, приводя к их преждевременному износу и выходу из строя.

4. *Питающую сеть*

При питании от автономных генераторов или других источников слабой мощности, особенно в конце линии электропередачи, падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника питания и этой линии при протекании больших пусковых токов приводит к просадке напряжения в сети. Просадка напряжения на щитах подстанции может составлять до 40% номинального (рис.1), что отрицательно сказывается на работе всего остального оборудования, участвующего в технологическом процессе и подключенного к этой сети (компьютеры, связь, терминалы релейной защиты и др.), а сам двигатель может не запуститься из-за снижения его момента пропорционально квадрату просадки напряжения.

Существующие решения и обоснование выбора типа устройства

Рассматривая существующие варианты решения для пуска высоковольтных электродвигателей с тяжёлыми условиями пуска (например, насосных агрегатов с открытой задвижкой), мы опирались на опыт применения систем частотно-регулируемого привода (ЧРП) на базе IGBT или IGCT приборов и систем на базе тиристорных устройств плавного пуска.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

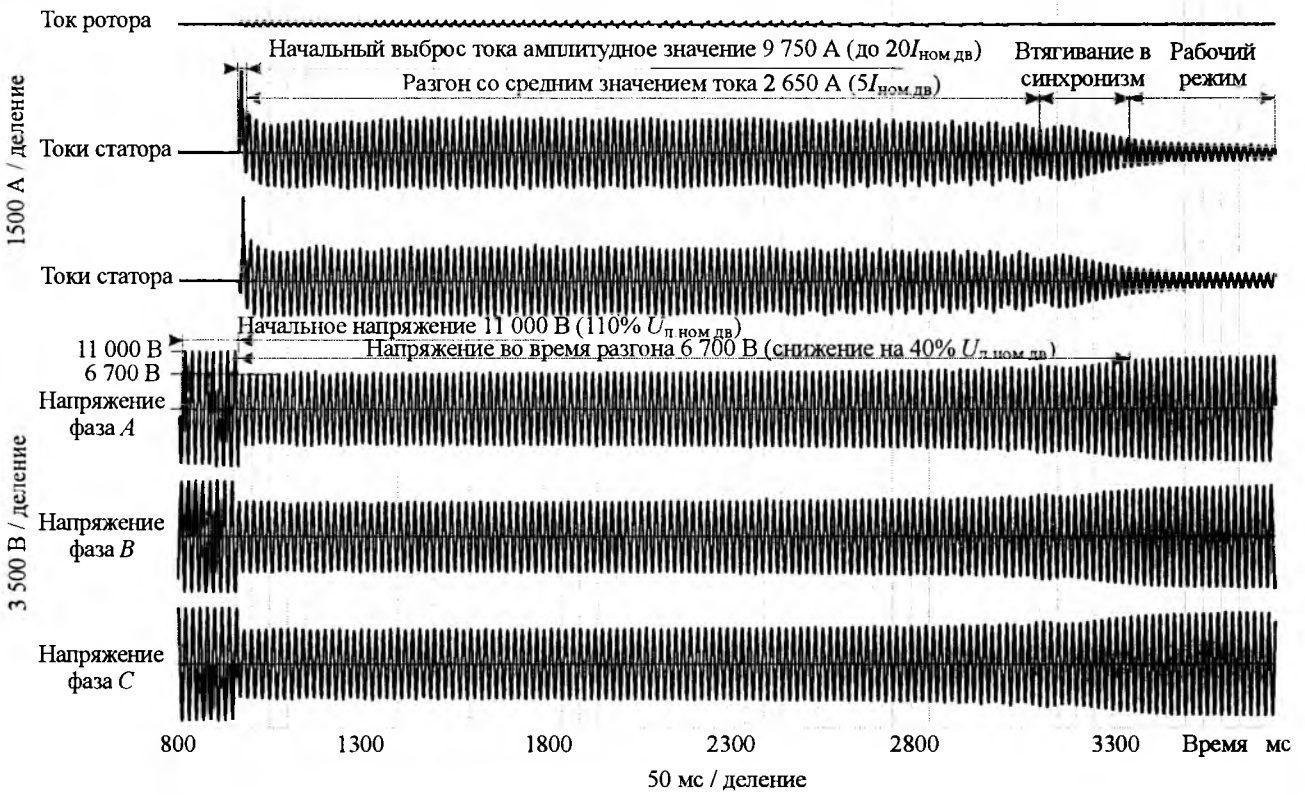


Рис.1. Осциллограммы фазного тока двигателя и линейного напряжения сети при прямом пуске синхронного двигателя магистрального насосного агрегата

При этом решающими факторами, определяющими выбор в пользу устройства плавного пуска (УПП), явились не только значительное снижение затрат на оборудование (рис.2), но и сложность обслуживания ЧРП. Так как в предлагаемом техническом решении одно УПП предназначено для поочередного пуска 4 двигателей, оно более, чем на порядок дешевле, значительно надёжнее и проще в эксплуатации, чем решение на базе ЧРП. Отсутствие частотного регулирования компенсируется возможностью ступенчатого регулирования давления и расхода на выходе станции числом последовательно или параллельно включенных насосных агрегатов, что вполне оправдано для насосных станций ОАО "АК "Транснефть".

Рис.2. Зависимость стоимости регулирования одного двигателя от числа двигателей, управляемых от одного ЧРП

Выбор элементов и построения системы управления

С учётом изложенного для исключения указанных недостатков прямого пуска на НПС "Аксинино" магистрального нефтепровода "Дружба" установлена автоматизированная система управления плавным пуском (АСУПП), функциональная схема подключения которой к действующей системе контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА) и высоковольтным двигателям показана на рис.3.

В действующей системе (рис.3) по команде "Пуск1" – "Пуск4" включается соответствующая ячейка и осуществляется прямой

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

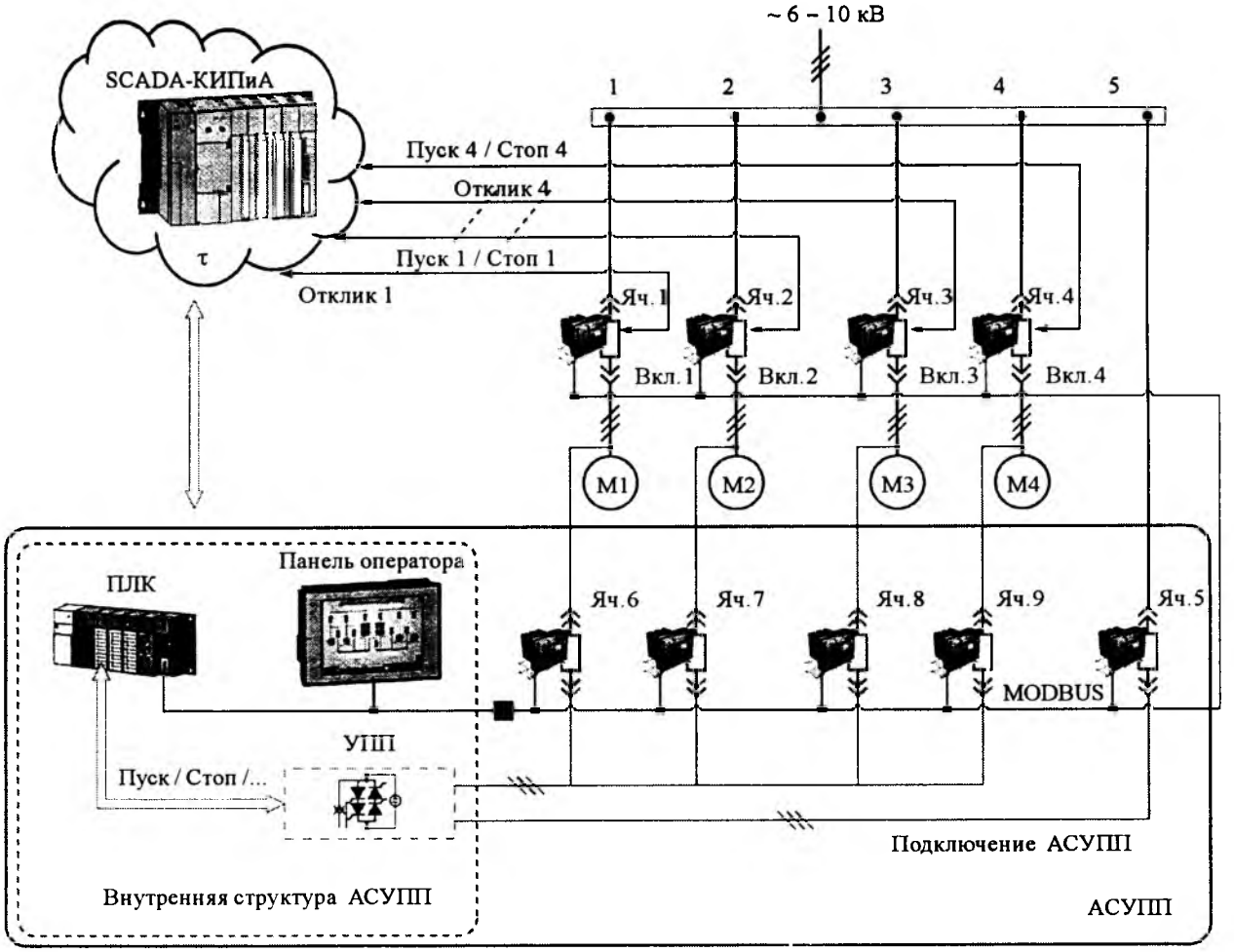


Рис.3. Функциональная схема подключения АСУПП к КИПиА и высоковольтным электродвигателям:
— действующая система; связь дискретными сигналами;
— подключение АСУПП; связь по протоколу Modbus

пуск двигателя *M1 – M4*. Если в течение времени t = 10 с не приходит отклика об успешном включении двигателя, система КИПиА автоматически включает второй (резервный) двигатель, обеспечивая тем самым гарантированное включение одного из насосов и процесс перекачки нефти в целом.

Внутренняя структура разработанной АСУПП для управления 4 двигателями показана на рис.3. Она состоит из следующих компонентов:

– программируемого логического контроллера с пультом управления (ПЛК) – 1;

– коммутационного высоковольтного оборудования 6 кВ (КВО) с устройствами релейной защиты и автоматики (РЗА) – 5;

– устройства плавного пуска 6 кВ (УПП) – 1.

При разработке структуры АСУПП были учтены требования как к самой системе, так и к входящим в её состав компонентам:

АСУПП

– построение по модульной архитектуре с возможностью в последующем дополняться и расширяться без какого-либо ущерба для первоначально поставленного оборудования;

ПЛК

– получение данных о состоянии устройств РЗА и УПП;

– получение, обработка и сохранение информации об аварийных событиях устройств РЗА и УПП, вывод на монитор местного пульта управления информации об оперативной обстановке – мнемосхема, надписи, подсказки оператору; сюда же, при необходимости, выводится из архива данных информация о предыдущих пусках;

– выполнение режима плавного пуска высоковольтных двигателей – предпусковая

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

подготовка ячеек, выдача команды на УПП для пуска выбранного двигателя и после выхода его на полную скорость включение шунтирующего выключателя;

– выполнение режима прямого пуска насосных агрегатов во всех режимах при отказе компонентов АСУПП;

КВО

– по командам ПЛК должно сконфигурировать силовую схему для пуска выбранного насосного агрегата.

УПП должно соответствовать следующим параметрам:

– линейное напряжение 6 кВ;

– номинальный ток асинхронного двигателя 549 А;

– мощность двигателя магистрального насосного агрегата (МНА) 5,0 МВт;

– предел регулирования пускового тока в диапазоне 200–500% $I_{ном}$;

– для привязки к технологическим и сезонным изменениям нагрузки возможность программирования нескольких кривых разгона с различными уставками уровня токоограничения;

– температура окружающей среды от –20°С до +40°С .

АСУПП обеспечивает три основных режима работы:

I. Режим "Ожидания": АСУПП готова к пуску. При этом осуществляется непрерывная самодиагностика и периодический контроль исправности компонентов "Системы". Данные диагностики передаются в ПЛК и отображаются на местном пульте управления.

II. Режим "Пуска": формирование команды "пуск" от КИПиА в штатном режиме либо по программе технологического автоматического ввода резерва (АВР):

– при готовности всех входящих в состав АСУПП компонентов осуществляется плавный пуск электродвигателя по заданному заранее графику разгона с выбранным уровнем токоограничения и контролем заданного времени разгона;

– при возникновении во время пуска неисправности в УПП либо входящих в состав АСУПП компонентов – прекращение режима плавного пуска и выполнение прямого пуска насосного агрегата;

– после завершения режима разгона и коммутации рабочей ячейки запущенного насосного агрегата АСУПП переходит в режим "Ожидание".

III. Режим "Авария": АСУПП не готова к работе. Включена сигнализация "Авария АСУПП". Работает режим прямого пуска – в ручном режиме или автоматическом от КИПиА и по схеме технологического АВР.

При подключении АСУПП (рис.3) команда "Пуск1" – "Пуск4" от КИПиА поступает на те же ячейки *1 – 4*, но перехватывается устройством РЗА и по каналу RS485 (протокол Modbus) передается логическому контроллеру, который по тому же каналу включает соответствующую ячейку *6 – 9* и после подтверждения о ее готовности посылает команду "Пуск" на УПП. Последнее включает питающую его ячейку *5* и начинает отработку алгоритма плавного разгона двигателя по выбранному заранее одному из возможных методов пуска. При выходе двигателя на полную скорость УПП шунтирует тиристоры встроенным байпасс-контактором и дискретным сигналом передает соответствующее сообщение логическому контроллеру, который по каналу RS485 включает основной шунтирующий выключатель – ячейку *1 – 4* и посылает затем команду "Стоп" на отключение УПП. По этой команде УПП отключает встроенный байпасс-контактор и питающую ячейку *5* и переходит в режим готовности к пуску следующего двигателя.

Положительной особенностью данного решения является и то, что введение АСУПП в схему управления пуском практически не ведет ни к каким изменениям в существующей системе КИПиА:

а) сигнал "ПУСК" поступает не непосредственно на включение ячеек *1 – 4*, а на вход АСУПП, которая сама управляет указанными ячейками;

б) вследствие того, что пуск осуществляется плавный с длительностью до 40 с, время τ ожидания отклика в системе КИПиА увеличено с 10 до 50 с.

Критерии выбора устройства плавного пуска МНА

Ключевым, наиболее ответственным и дорогостоящим звеном в АСУПП является уст-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ройство плавного пуска, поэтому к его выбору следует подходить весьма серьезно с учётом интегрального критерия качества и требований исключительно высокой надёжности при эксплуатации. В связи с этим из присутствующих в настоящее время на мировом рынке устройств подобного назначения заказчиком было отдано предпочтение высоковольтным устройствам плавного пуска типа SSM компании АББ, которые в наибольшей степени удовлетворяют указанным критериям[1]. Их достоинствами по сравнению с обычными устройствами являются широкие функциональные возможности и глубоко продуманные решения вопросов надёжности оборудования и безопасности обслуживающего персонала. Эти решения разделяются на технические и конструктивные.

Технические решения

Очень важным звеном для правильного функционирования и надёжности системы является схема управления включением тиристоров. Формирование неверных временных диаграмм сигналов на управляющих электродах тиристоров может быть причиной их ложного включения или невключения в нужный момент, а также несимметрии выходных напряжения и тока. Серия SSM разработана с учётом устранения этих недостатков, обеспечивая плавный, надёжный и повторяемый пуск без необходимости использования реакторов или иных внешних устройств, устанавливаемых в других системах, независимо от параметров питающей сети (внутреннее сопротивление источника и линии связи, коммутационные провалы и т.д.). Это обеспечивается введением в алгоритм работы следующих специальных функций:

– *автоматической синхронизации импульсов управления,* согласующей угол зажигания каждой фазы с напряжением соответствующей фазы; SSM также активно отслеживает незначительные изменения частоты сети, избегая ненужного защитного отключения, которое может произойти в устройствах с традиционными системами зажигания; данная функция особенно полезна при питании устройства от передвижных или резервных генераторов, позволяя использовать SSM в приложениях с нестабильной системой силового питания (колебания частоты до 6 Гц);

– *метода удлинённого управляющего импульса,* в отличие от многих фирм, использующих частотное заполнение стробирующего импульса для формирования сигналов управления тиристором, в SSM на управляющем электроде поддерживается постоянное напряжение неизменного уровня нужной длительности, гарантируя, что стробирующий импульс постоянного тока включит тиристор, даже если в критический момент в линии связи присутствуют помехи; это, конечно, повышает требования к мощности источника питания цепей управления, однако компания АББ сознательно идёт на такое решение, обеспечивая тем самым более высокую помехозащищенность SSM и гораздо меньшую вероятность пропусков включения тиристоров, что повышает надёжность системы зажигания и устройства в целом;

– *управления зажиганием с использованием обратной связи* – метода определения момента зажигания тиристора, основанного на получении желаемого результата на выходе; для этого цифровой контроллер, управляющий зажиганием, использует сигналы обратной связи по току и напряжению, обеспечивая во время пуска плавное нарастание заданной выходной величины по установленному закону и снижая вероятность несимметричных режимов, которые ведут к ненужному дополнительному нагреву двигателя;

– *трансформаторной развязки цепей зажигания,* препятствующей влиянию сетевых помех, которые могут иметь место, на управляющие сигналы; специально разработанные трёхфазные развязывающие трансформаторы на напряжение 120 В обеспечивают измерение напряжения, питание платы зажигания и плат драйверов, изолируя их от напряжения сети; тороидальные трансформаторы с высокой степенью изоляции понижают переменное напряжение для питания схемы формирования удлинённого управляющего импульса, обеспечивая дальнейшую изоляцию уп-

[1] **Поздеев Д.А., Нудельман Г.С., Ерезеев А.Н.** Высоковольтные устройства плавного пуска синхронных и асинхронных электроприводов // Энергослужба предприятия. 2004. № 3. С. 12–15.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

равляющего электрода тиристора; дополнительная изоляция обеспечивается через отдельный трансформатор цепей управления, который питает все низковольтные цепи и плату цифрового контроллера.

Оптоволоконная изоляция используется для всех сигналов связи между подсистемами высокого и низкого напряжения. Кроме оптической развязки управляющих сигналов на тиристоры, необходимость которой доказана опытом работы многих фирм, в SSM такая развязка выполнена и для цепей обратной связи по току, утечки на "землю", а также по температуре радиаторов тиристоров, аналогов чему пока нет в мировой практике (рис.4).

Во всех режимах работы УПП, имея информацию о напряжении и фазных токах двигателя, полностью защищает его в аварийных ситуациях (более 20 защит), включая и тепловую защиту. Последняя (рис.5) выполнена на основе полной тепловой модели двигателя с учётом изменения условий охлаждения при изменении частоты вращения, температуры окружающей среды, а также с учётом дополнительного нагрева двигателя при несимметрии его фазных токов[1]. При этом входная информация для регистра нагрева рассчитывается из уровня I^2t, несимметрии токов, скорости охлаждения из показаний датчиков температуры, в результате SSM может по-разному контролировать условия работы для режимов "Разгон", "Замедление" и "Работа с шунтирующим контактором", благодаря постоянной коррекции тепловой модели обеспечивается наиболее полная и правильная защита двигателя от теп-

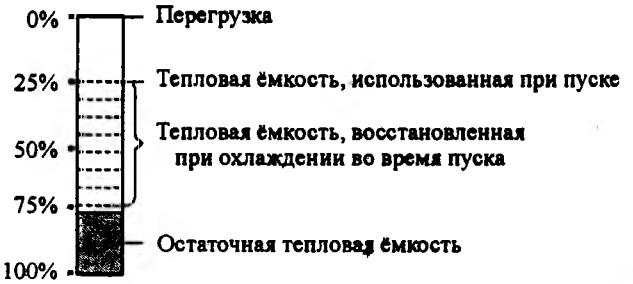


Рис.5. Тепловая модель двигателя

ловой перегрузки в любой момент его работы.

Дополнительная возможность программирования в памяти УПП SSM до пяти кривых разгона делает это устройство исключительно гибким инструментом для учёта технологических или сезонных изменений нагрузки и мягкого пуска двигателей в наиболее благоприятном для них режиме.

Конструктивные решения

УПП имеет два варианта исполнения: с высоковольтной вводной ячейкой, куда входят разъединитель с видимым разрывом, силовые предохранители и вводной вакуумный контактор или выключатель (отдельный шкаф), и без неё, если у заказчика уже имеется вводное высоковольтное распредустройство (в этом случае исполнение устройства называется "УПП без вводной ячейки"). В обоих случаях для безопасности персонала двери шкафов оснащены механическими или электромагнитными блокировками со следующим принципом работы:

а) если подано силовое напряжение на устройство, двери шкафов нельзя открыть;

б) если двери какого-либо шкафа открыты,

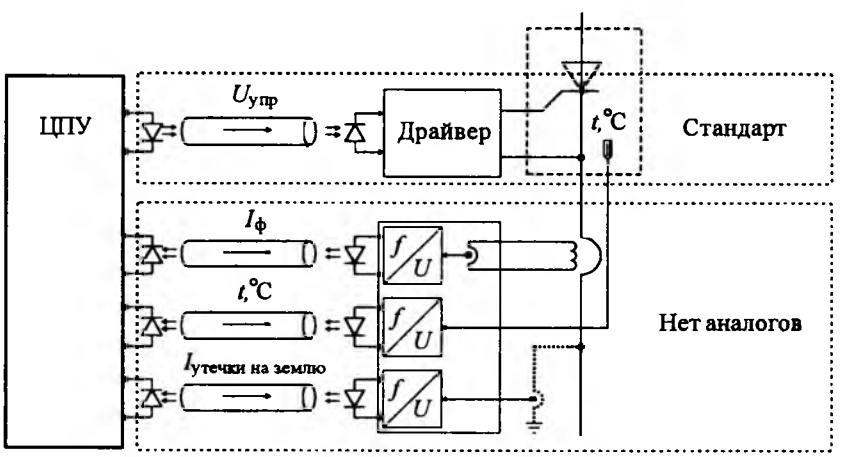


Рис.4. Оптическая развязка цепей управления и силовой части

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

нельзя подать силовое напряжение на устройство.

Кроме того, двери секций высокого напряжения приспособлены для запирания их навесным замком, а секции низкого напряжения – встроенным замком для исключения несанкционированного доступа и надёжной защиты персонала. Удобный ввод силового напряжения и вывод кабеля на двигатель – сверху, снизу шкафа или в верхней части обеих боковых стенок шкафа, высокая степень защиты – IP54, широкий диапазон рабочих температур – от –20°С (с подогревателем) до +40°С обеспечивают быстроту и удобство монтажа и надёжную работу в различных климатических условиях.

Наличие встроенного в УПП байпасс-контактора придаёт системе повышенную живучесть в аварийных ситуациях, так как даже при отказе шунтирующего выключателя (ячейки *1 – 4* на рис.3) двигатель насоса остаётся в работе благодаря упомянутому контактору.

Функционально устройство включает в себя:

1. Пульт оператора для программирования функций защиты и параметров УПП.
2. Оптически развязанный низковольтный отсек.
3. Встроенный трансформатор цепей управления* и измерительные трансформаторы.
4. Разъединитель, рассчитанный на возможность разрыва цепи при полном токе нагрузки и блокирующий открытие дверей УПП при его замыкании*.
5. Заземляющую шину и ножи, видимые через смотровое окно*.
6. Силовые предохранители с индикацией перегорания*.
7. Вводной вакуумный контактор*.
8. Шунтирующий контактор, рассчитанный на прямое подключение двигателя к сети.
9. Тиристорные модули с гальванической развязкой сигналов управления и повышенной надёжностью цепей управления;

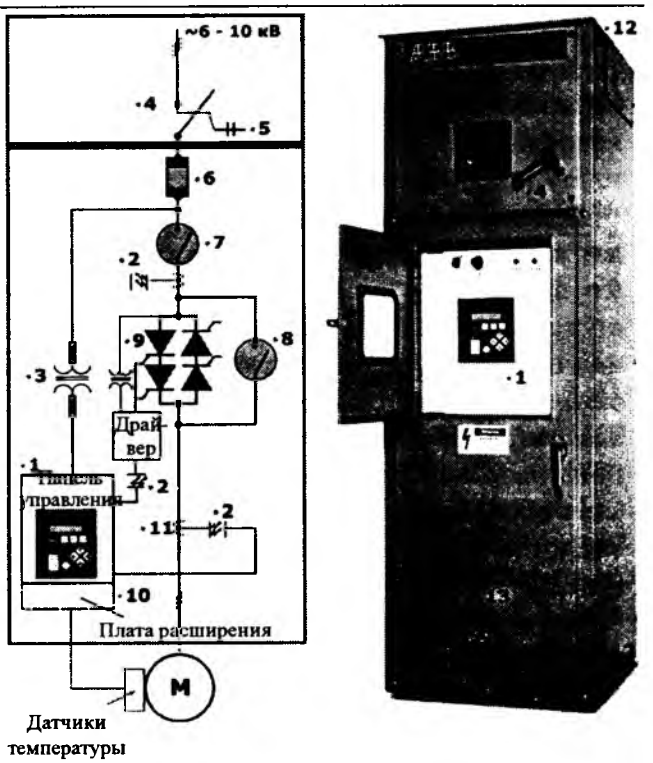


Рис.6. Состав и функциональная схема (*а*) и внешний вид (*б*) УПП SSM

10. Дополнительную плату для подключения датчиков температуры (до 12 резистивных датчиков).
11. Датчик тока утечки на землю.

Ввод кабеля силового питания осуществляется, как правило, сверху или сбоку шкафа, вывод на двигатель – снизу. Для удобства монтажа применяются съёмные панели.

Стальной корпус образует жёсткую конструкцию и имеет степень защиты IP54, IP21 или IP00.

Привязка к технологии трубопровода и электроснабжения

Функциональная технологическая схема участка перекачки нефти показана на рис.7. С учётом того, что на НПС "Аксинино" используются 4 насоса и существует 2 независимых ввода электропитания для гарантированного запуска любого насоса от любого из двух вводов на станции установлены два идентичных УПП в составе АСУПП, так что каждое устройство плавного пуска может запустить любой из 4 двигателей. При этом для повышения надёжности работы и безопасности персонала алгоритм функционирования системы построен таким образом, что:

* Возможна поставка УПП без встроенной вводной ячейки. В таком исполнении УПП не содержит разъединитель, предохранители, вводной контактор и трансформатор цепей управления. Для работы необходима высоковольтная вводная ячейка заказчика.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

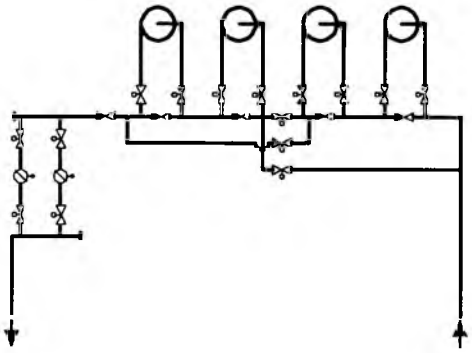


Рис.7. Функциональная технологическая схема участка перекачки нефти

– только одно УПП находится в работе;

– резервное УПП гарантировано отключено от линии 6 кВ.

В процессе эксплуатации выяснилось, что при программировании режима пуска в памяти УПП нельзя пренебрегать такими характеристиками насосной станции как:

– влияние температуры (вязкость нефти);

– изменение давления на входе при различных режимах перекачки;

– число работающих насосов;

– запуск на открытую или открывающуюся задвижку.

Это объясняется изменением нагрузки на двигатель (рис.8) в функции указанных параметров (смещением характеристики $M_c = f(\omega)$ на рис.8). Экспериментально получен диапазон требуемых уровней токоограничения для гарантированного пуска двигателя в различных режимах работы: $I_{огр} = (3{,}5 \div 4{,}2) I_{ном}$.

Необходимость учёта данных особенностей также иллюстрирует рис.9: при токоограничении $4{,}2 I_{ном}$ время пуска агрегата находится в пределах от 9,5 до 17 с в зависимости от режима работы:

1 – режим ввода в работу второго агрегата при уже работающем первом агрегате;

2–5 – графики промежуточных режимов работы, отражающие влияние положения задвижки, температуры среды, давления в трубопроводе, производительность агрегата;

6 – режим запуска станции зимой, после её длительной остановки, при этом запуск агрегата осуществляется на открытую задвижку.

Для оперативного выбора персоналом уровня токоограничения и времени пуска используется функция УПП SSM запуска по одному из 5 заранее запрограммированных режимов, что делает разработанную АСУПП исключительно гибким инструментом в руках инженера-технолога при её эксплуатации на нефтеперекачивающих станциях.

Опытно-промышленная эксплуатация АСУПП в течение двух лет показала её высокую эффективность и надёжность. На рис.9 представлены диаграммы линейного напряжения и фазных токов двигателя при плавном пуске насосного агрегата. Отметим, что в случае срабатывания любой защиты УПП,

Рис.8. Механическая характеристика МНА

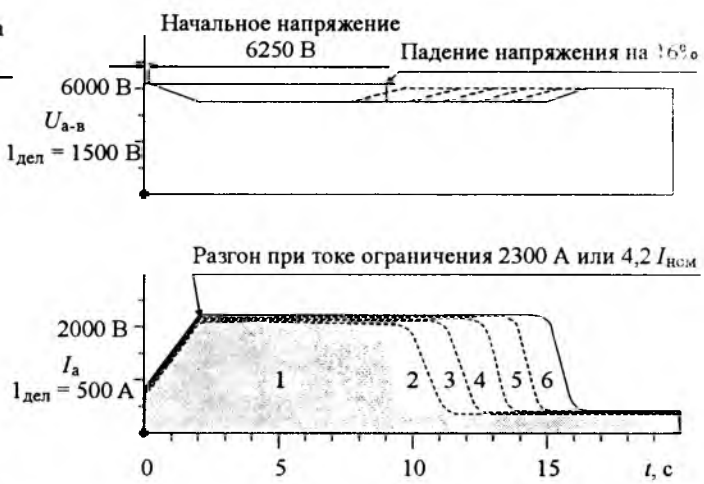


Рис.9. Диаграммы линейного напряжения и фазного тока при различных условиях пуска насосного агрегата

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

отказе ячеек на входе или выходе УПП в процессе пуска система АСУПП включает шунтирующую ячейку *1–4* (прямой пуск), обеспечивая гарантированное включение двигателя.

Выводы

Разработанная АСУПП является эффективным решением устранения серьёзных недостатков прямого пуска высоковольтных двигателей, легко подключается к существующей системе автоматики, продемонстрировала надёжную работу. Обеспечивается гарантированное включение любого из 4 насосных агрегатов при любых нештатных ситуациях на центральном распределительном пункте НПС. АСУПП является гибким инструментом при её эксплуатации на НПС.

АСУПП рекомендована для внедрения на других НПС ОАО "Транснефть".

Поздеев Дмитрий Анатольевич – главный специалист по электроприводу ООО "АББ Автоматизация", канд. техн. наук. Защитил диссертацию по теме "Разработка быстродействующих электроприводов металлорежущих станков с пониженной чувствительностью к вариациям параметров упругого исполнительного механизма" в 1979 г.

Ерезеев А.Н. – инженер ООО "АББ Автоматизация". Защитил магистерскую диссертацию по теме "Исследование режимов пуска высоковольтного асинхронного двигателя газового компрессора мощностью 6,5 МВт с помощью устройства плавного пуска".

Яковлев Олег Геннадьевич – главный инженер проекта ООО НПФ "Мантика". Окончил МВТУ им. Баумана в 1993 г.

Котельников О.В. – главный энергетик БРУ ОАО "МН Дружба".

Применение линейных электродвигателей для установок колебательного движения

ШЫМЧАК П. (Польша)

Анализируются возможности использования линейных асинхронных электродвигателей для установок колебательного движения, в частности колоколов. Рассматриваются особенности конструкции механической части установки, включающей в себя линейный асинхронный электродвигатель, и функциональная схема системы автоматического управления. Приводится математическая модель нелинейной двухмассовой системы управления колоколом, пригодная для решения задач проектирования и анализа систем коле-бательного движения с гравитационным характером нагрузки. Показана целесообразность применения линейных асинхронных электродвигателей для установок данного класса.

Opportunities of use of linear asynchronous electric motors for installations of oscillatory movement, a particular of bells, are analyzed. Features of a design of a mechanical part of the installation including the linear asynchronous electric motor, and a function chart of system of automatic control are considered. The mathematical model of a nonlinear two-mass bell control system, suitable for the decision of problems of designing and analysis the drive with oscillatory movement and gravitational character of loading is resulted. The expediency of application of linear asynchronous electric motors for installations of the given class is shown.

Большой класс установок требует организации колебательного движения рабочего органа. К таким установкам могут быть отнесены нефтяные насосы–качалки, генераторы волн и т.д. Особую группу среди таких установок составляют системы, в которых рабочий орган подвержен гравитационному воздействию, оказывающему существенное влияние на формирование характера движения. Эта особенность отличает эти установки от аналогичных установок с упругими возвратными элементами [1]. В данной статье рассматриваются вопросы использования линейного асинхронного двигателя для установок колебательного движения с гравитационным характером нагрузки. Наиболее трудной

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

задачей можно считать формирование колебательного движения колокола, представляющего собой двухмассовую нелинейную систему. Рассмотрению вопросов построения системы автоматического управления приводом колокола и посвящена данная статья.

При управлении колоколом используют два основных способа извлечения звука. Первый осуществляется путём раскачивания языка и соударения его с неподвижной чашей, второй предполагает раскачивание чаши и последующее соударение её со свободно подвешенным языком. Второй способ является более предпочтительным, так как улучшает качество и силу звучания благодаря пространственному колебанию чаши. Однако он требует больших затрат механической энергии, что усложняет задачу выбора привода и управление им.

Для управления колоколом в настоящее время используется электрический привод, который может быть выполнен на основе электромагнитов или электродвигателей вращательного движения. Использование привода с электродвигателями вращательного движения можно считать традиционным. В то же время представляет интерес применение для этой цели линейного асинхронного двигателя, позволяющего упростить кинематическую схему привода за счёт исключения механических передач и более точно управлять движением и, следовательно, звучанием колокола. К недостаткам привода с линейным двигателем следует отнести низкие энергетические характеристики и необходимость в специальной подвеске колокола. Тем не менее, применение привода с линейными двигателями для рассматриваемого класса устройств можно считать перспективным благодаря целому ряду достоинств [2].

В Институте электротехники Щецинского технического университета (Польша) была разработана схема механической части колокольной установки с линейным асинхронным двигателем (рис.1). Чаша *1* колокола жёстко закреплена на раме *2* с помощью штанги *3*. Рама *2* имеет возможность поворачиваться в подшипниках *4*, установленных на станине *5*. На раме *2* на расстоянии *r* от оси подшипников *4* жёстко укреплён вторичный элемент (ротор) линейного асинхронного двигателя,

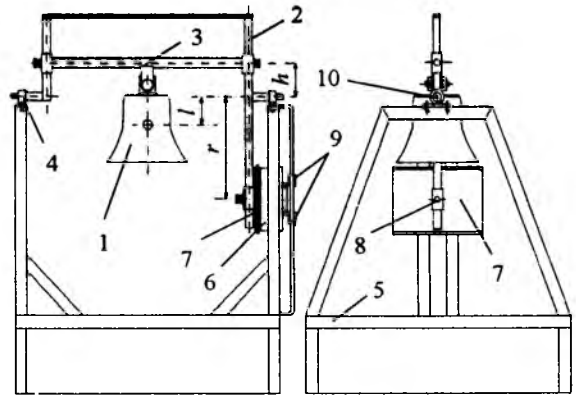


Рис.1. Схема механической части установки с линейным электроприводом колокола

индуктор *6* (статор) которого жёстко укреплен на станине *5* с помощью винтов *9*. Эти же винты используются и для регулировки воздушного зазора между индуктором и вторичным элементом. Фиксация выбранного положения вторичного элемента *7* относительно индуктора *6* осуществляется винтом *8*. На оси рамы *2* установлен датчик положения чаши колокола *10*. Штанга *3*, на которой укреплена чаша *1* колокола, расположена на расстоянии *h* от оси поворота рамы *2* (оси подшипников *4*). Внутри чаши *1* колокола на расстоянии *l* свободно подвешен язык (на рис.1 не показан). Для упрощения конструкции и настройки привода линейный двигатель выполнен с односторонним расположением индуктора *6* относительно вторичного элемента *7*.

Для устройств с колебательным движением рабочего органа предпочтительной является дугообразная форма индуктора и вторичного элемента [3]. Однако в рассматриваемом случае использован выпускаемый промышленностью линейный двигатель с прямоугольной формой индуктора и вторичного элемента. Применение линейного двигателя с прямоугольной формой индуктора усложняет только алгоритм управления и не оказывает влияния на качественные показатели колебательного процесса. Рассмотренная конструкция не имеет кинематических передач, обеспечивает свободное качание чаши колокола и соударение её со свободно качающимся языком, а также предоставляет возможность проводить настройку привода и контроль параметров колебаний.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Для управления звучанием колокола разработана система управления, функциональная схема которой приведена на рис.2. К колоколу периодически прикладывается усилие ΔE, создаваемое односторонним линейным асинхронным двигателем *ОЛАД*. Энергия E_n соударения чаши колокола с языком переходит в энергию звучания колокола. Угловая частота ω колебаний чаши колокола воспринимается датчиком, на выходе которого вырабатывается сигнал Δt, пропорциональный углу α отклонения чаши от положения равновесия. Длительность импульса Δt с выхода датчика сравнивается с эталонным временем t_u, формируемым на выходе задатчика. Время включения двигателя t_z в каждом периоде колебаний определяется регулятором. Силовая часть регулятора представляет собой трёхфазный тиристорный (реверсивный или нереверсивный) регулятор напряжения промышленной частоты, обеспечивающий регулирование напряжения на двигателе и защиту от КЗ и перегрузок.

Алгоритм работы системы управления характеризуется рядом особенностей, определяемых спецификой взаимодействия чаши и языка колокола при воспроизведении звука.

На начальном этапе осуществляется раскачивание чаши колокола из состояния покоя до первого полного соударения с языком. С целью снижения установленной мощности двигателя раскачивание чаши целесообразно осуществлять в течение 5–8 начальных колебаний колокола без его звучания. Импульсное воздействие двигателя на чашу колокола осуществляется в течение времени t_z при неподвижной чаше и при максимальных отклонениях чаши от положения равновесия. Датчик вырабатывает сигналы, дающие информацию о значении и направлении угловых перемещений. Возможны два режима работы электропривода на начальном этапе. В первом случае двигатель однократно за период колебаний прикладывает силу только в одном направлении, что позволяет использовать нереверсивное управление двигателем. Во втором случае используется реверсивное управление двигателем, при котором сила прикладывается к чаше дважды за период. Второй вариант управления рекомендуется применять для колоколов с большой массой.

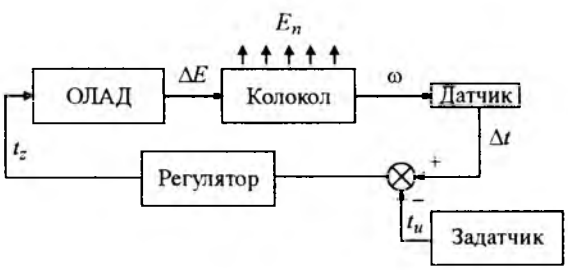


Рис.2. Функциональная схема системы управления колоколом

Установившийся режим характеризуется свободными колебаниями колокола с обеспечением требуемого звучания. Энергия привода в этом режиме расходуется на потери от сил трения. При этом двигатель включается периодически (дважды либо однажды за период свободных колебаний) и частота включений кратна частоте свободных колебаний колокола.

Тормозной режим крайне важен для обеспечения качественного звучания, поскольку осуществляет эффективное замедление чаши колокола, при котором последующие затухающие колебания гарантировали бы прекращение звучания колокола. В этом режиме двигатель однократно включается, создавая тормозящую силу.

Электропривод колокола работает в кратковременном режиме (время работы колокола не превышает 5–10 мин). Именно для такого характера работы привода наилучшим образом подходит линейный асинхронный двигатель.

Для разработки методики проектирования установки и системы управления колоколом была создана математическая модель. Уравнение движения чаши с рамой по закону Ньютона можно записать в виде

$$J\frac{d^2\alpha}{dt^2} = M_s(t,\alpha) - M_g(\alpha) - M_t(\omega), \qquad (1)$$

где J – суммарный момент инерции чаши с рамой; $M_s = Fr\cos(\alpha)KK_c$ – приводной момент чаши, определяемый как произведение силы на плечо r; F – сила тяги линейного двигателя при $\alpha = 0$; K – коэффициент, учитывающий угловое смещение вторичного элемента и степень его взаимного перекрытия с индуктором; K_e – коэффициент, учитывающий влияние краевых эффектов; M_g – момент от сил гравитации чаши и рамы, $M_g = mgl\sin(\alpha)$, где m – суммарная масса под-вижной части; g –

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ускорение силы тяжести; l – расстояние от центра тяжести до оси вращения; α – угол отклонения чаши от положения равновесия; $M_t = b_t\omega + c_{тр}\omega^2 \approx b_t\omega$ – суммарный момент сопротивления, учитывающий *сухое* и *вязкое* трение, где $b_{тр}$ – коэффициент трения; $c_{тр}$ – коэффициент трения чаши о воздух; ω – угловая скорость.

В уравнении (1) не учтён гравитационный момент языка колокола. Это допущение правомерно с учётом двух обстоятельств: точка подвеса языка находится вблизи оси вращения чаши; во время установившегося режима работы не существует другой точки соприкосновения чаши и языка, кроме точки подвеса.

Аналогично записываем уравнение для движения языка внутри чаши:

$$J_s\frac{d^2\alpha_s}{dt^2} = -M_{gs}(\alpha_s) - M_{ts}(\omega_s), \qquad (2)$$

где J_s – момент инерции языка; $M_{ts} = b_{ts}\omega$ – момент трения языка; b_{ts} – коэффициент трения языка.

Соударение чаши с языком наступает при выполнении условия

$$|\alpha - \alpha_s| = \gamma,$$

где α_s – угол отклонения языка; γ – угол соударения.

Скорости чаши и языка получаем из системы двух уравнений, составленных на основе момента количества движения, а также закона сохранения энергии:

$$J\omega_2 + J_s\omega_{s2} = J\omega_1 + J_s\omega_{s1}; \qquad (3)$$

$$\frac{J\omega_2^2}{2} + \frac{J_s\omega_{s2}^2}{2} = \frac{J\omega_1^2}{2} + \frac{J_s\omega_{s1}^2}{2}, \qquad (4)$$

где ω_1, ω_{s1} – скорости соответственно чаши и языка до соударения; ω_2, ω_{s2} – скорости чаши и языка после соударения.

Акустическая энергия, возникающая во время соударения, учитывается путём умножения угловых скоростей на коэффициент потери скорости ($K_{п.с}$).

С учётом (3) и (4) уравнения колебаний чаши и языка примут вид:

– для режима разгона, когда $|\alpha - \alpha_s| < \gamma$,

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{b_t}{J}\omega + \frac{-mgl}{J}\sin(\alpha) + F(t,\omega)\frac{\beta - |\alpha|}{\beta}\frac{l\cos(\alpha)}{J}; \qquad (5)$$

$$\frac{d\alpha_s}{dt} = \omega_s; \qquad (6)$$

– для установившегося режима, когда $|\alpha - \alpha_s| = \gamma$,

$$\omega_2 = \frac{\omega_1(1 - j_s) + 2j_s\omega_{s1}}{j_s + 1}K_{п.с}; \qquad (7)$$

$$\omega_{2s} = \frac{-\omega_1(1 - j_s) + 2\omega_1}{j_s + 1}K_{п.с}; \qquad (8)$$

где $j_s = J_s / J$.

Для языка при затухании после последнего соударения система уравнений записывается в виде:

$$\frac{d\omega_s}{dt} = -\frac{b_{ts}}{J_s}\omega_s + \frac{-m_s g l_s}{J_s}\sin(\alpha_s); \qquad (9)$$

$$\frac{d\alpha_s}{dt} = \omega_s. \qquad (10)$$

Таким образом, математическая модель системы управления колоколом с линейным электродвигателем включает нелинейные уравнения (5)–(10). Они позволяют исследовать действующую систему и проектировать новую с заданными свойствами. Решение уравнений (5)–(10) возможно проводить только численными методами. Характерно, что после линеаризации уравнений (5)–(10) и без учёта явления соударения получаем известное уравнение физического маятника с периодом колебаний

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgl}}.$$

Это в некоторой степени подтверждает правильность полученных выражений. В рассматриваемом случае решение уравнений (5)–(10) проводилось с использованием пакета прикладных программ MATLAB при нулевых начальных условиях. Результаты исследования системы приведены в [4]. Параметры механической части системы управления колоколом определялись на основе экспериментальных исследований макета установки. Методика определения параметров системы приведена в [5]. Экспериментальные исследования подтвердили адекватность разработанной модели системы управления колоколом, возможность достижения требуемых характеристик звучания колокола и це-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

лесообразность применения линейного асинхронного двигателя для формирования колебательного движения в сложных установках, подобного рода.

Список литературы

1. **Tajemnice** starych dzwonow Torunia i Chelmna, w 500-tną rocznicę ulania wielkiego Tuba Dei spisane, praca zbiorowa pod red. T. Jaworskiego, M. Nasieniewskiego i K. Przegiętki Torun: Wydawnictwo TNOiK, 2001.

2. **Gieras J.F.** Linear Induction Drives. Oxford: University Press, 1994.

3. **Шымчак П., Кадлубски А.** Специальное применение линейных асинхронных двигателей // Proc. of the Inter. Conf. on Unconventional Electromechanical and Elect-rotechnical Systems. TU of Szczecin, Institute of Electrical Engineering. Sevastopol, 1995. С. 343–350.

4. **Szymczak P.** Automated linear induction motor – based drive for church bells // Proc. of the 6th Inter. Conf. on Problems of Automated Electrodrivers. Theory and Aplications. Alushta, 1998. С. 320–321.

5. **Шымчак П., Яблоньски Д.** Электропривод колоколов с применением ЛАД // Вестник УГТУ-УПИ. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. № 5 (25).

СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ

Реализация последовательностных логических функций на элементах программируемой логики

БОРОДЕНКО В.А.

Показано, что использование последовательностной логической функции (ПЛФ) ОПЕРЕЖЕНИЕ упрощает анализ и синтез устройств автоматики энергосистем и способствует их унификации. Рассмотрены особенности реализации ПЛФ в устройствах на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

It is shown, that use sequential logic function (SLF) the ADVANCING simplifies the analysis and synthesis of power supply systems automatics devices and promotes their unification. Features of realization SLF in devices on FPGA basis are considered.

Контроль последовательности формирования заданных значений входных переменных достаточно широко используется в устройствах релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА) энергосистем. Для описания соответствующих алгоритмов функционирования может применяться последовательностная логическая функция (ПЛФ) совпадения ОПЕРЕЖЕНИЕ [1].

Оператор ОПЕРЕЖЕНИЕ (→) указывает на порядок образования единичных значений логических переменных, при котором выполняется функциональная зависимость (при переходе от 0 к 1). В соответствии с назначением оператора запись вида $y = \overrightarrow{x_1 x_2}$ отражает следующее условие истинности: y равен логической 1, если обе независимые переменные становятся равными 1, причём x_1 раньше, чем x_2. Опережение некоторого сигнала определяется относительно порога времени, за который принимают момент образования заданного значения сопоставляемого сигнала. Приоритет функции ОПЕРЕЖЕНИЕ равносилен приоритету логического отрицания. Свойства ПЛФ, соответствие их основным законам и аксиомам алгебры логики исследованы в [2].

Запись последовательностных логических функций формулами комбинационной логики, устанавливающими в явном виде соответ-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ствие значения функции значениям аргументов, упрощает инженерную процедуру анализа и синтеза конечных автоматов. Кроме того, использование ПЛФ при анализе и синтезе устройств РЗ и ПА способствует унификации устройств с разной логической структурой либо выполненных на неодинаковой элементной базе.

Статья демонстрирует применение ПЛФ при описании устройств на существующей релейно-контактной элементной базе и рассматривает особенности реализации ПЛФ в устройствах на перспективной элементной базе – программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Предполагается, что разработка устройств автоматики производится персоналом обычных служб релейной защиты или лабораторий электроцехов энергопредприятий.

Применим вначале расширенный аппарат алгебры логики, включающий комбинационные функции, временны́е булевы функции [3] и последовательностные логические функции, для описания некоторых известных типовых устройств ПА.

Пример 1 – схема устройства автоматики, реагирующего на скорость изменения частоты [4] и используемого в защитах от потери питания электродвигателей. Реле частоты *KF1* и *KF2* (рис.1,*а*) настроены на частоты срабатывания $f_1 > f_2$. Если скорость снижения частоты мала, запущенное контактом *KF1* реле времени *KT* разомкнёт цепь катушки реле *KL* раньше, чем замкнутся контакты реле частоты *KF2*, устройство не срабатывает.

Описание схемы без ПЛФ ОПЕРЕЖЕНИЕ $KL = KL + \overline{KT}\cdot KF2 = KL + KF1\cdot D^t\cdot KF2 = KF1\cdot D^t\cdot KF2\cdot П$

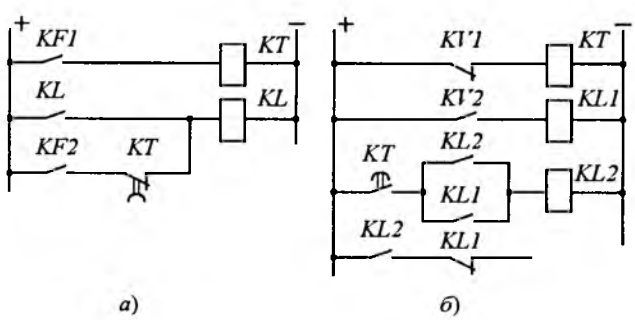


Рис.1. Автоматика пуска по скорости снижения частоты (*а*) и схема синхронизатора СПУО (*б*)

содержит временны́е булевы функции ОГРАНИЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА D^t и ПАМЯТЬ *П*, причём в выражении отсутствует переменная сброса памяти, что является ошибкой схемы.

Алгоритм, записанный посредством ПЛФ ОПЕРЕЖЕНИЕ, не только нагляднее, но и не содержит указанного ошибочного запоминания сигнала без его сброса:

$$KL = \overline{KF1\cdot D^{\uparrow}\cdot RF2}. \qquad (1)$$

Логическое высказывание истинно, если имеются сигналы от обоих реле частоты, причём задержанный на время *t* сигнал первого реле частоты формируется ранее появления сигнала второго реле частоты. (Здесь $D^{\uparrow}$ – оператор задержки появления сигнала на время *t*).

Пример 2 – схема автоматики точной синхронизации генератора [5] с постоянным углом опережения (СПУО). Пусковые реле напряжения *KV1* и *KV2* (рис.1,*б*) срабатывают на спаде полуволны напряжения биений, причём *KV1* раньше, так как имеет более высокую уставку. Контактом *KV1* запускается элемент задержки *KT*, отсчитывающий интервал времени *t*. Если выдержка времени *KT* истекает прежде срабатывания *KV2*, синхронизатор срабатывает на включение генераторного выключателя (значение скольжения соответствует допустимому), в противном случае он не должен действовать.

Соответственно формулируются логические высказывания для отдельных элементов и существующей схемы в целом:

$$KT = \overline{KV1}\cdot D^{\uparrow};$$

$$KL1 = KV2;$$

$$KL2 = KT(KL1 + KL2) = \overline{KV1}\cdot D^{\uparrow}(KV2 + KL2)\times$$
$$\times\overline{KV2} = \overline{KV1}\cdot D^{\uparrow}(KV2 + KL2);$$

$$Y = KL2\cdot\overline{KL1} = \overline{KV1}\cdot D^{\uparrow}(KV2 + KL2)\overline{KV2} =$$
$$= \overline{KV1}\cdot D^{\uparrow}\cdot KL2\cdot\overline{KV2}.$$

Алгоритм, построенный с использованием ПЛФ, более компактен и ясен, использует всего одну промежуточную переменную *t*:

$$Y = \overline{\overline{KV1}\cdot D^{\uparrow}\cdot\overline{KV2}}.$$

Он указывает на то, что синхронизатор возбуждается (функция *Y* истинна), когда по-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ступают одновременно сигнал об отсутствии напряжения биений на уровне *KV2* и задержанный на время *t* сигнал об отсутствии напряжения на уровне *KV1*, причём последний прежде первого.

Сравнение данного алгоритма с (1) позволяет сделать вывод, что логическая часть обоих устройств может быть выполнена идентично. Таким образом, использование ПЛФ позволяет не только упростить запись логических выражений, но и попутно унифицировать структуру разных устройств автоматики.

Перейдём к бесконтактной элементной базе. Реализуем элементарный последовательностный логический элемент (ПЛЭ) совпадения на основе ячейки ПАМЯТЬ (асинхронного триггера). Предусмотрим для него одновременно контроль и опережения, и отставания двух сигналов при их совпадении, т.е. воспроизведение логических зависимостей:

$$\left.\begin{aligned} y_1 &= \overrightarrow{x_1}x_2; \\ y_2 &= x_1\overrightarrow{x_2}. \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

В примерах используется программируемая логика фирмы "Altera" [6], в частности, распространённые ПЛИС семейства MAX 7000, выполненные по технологии ППЗУ с электрическим стиранием (EEPROM), которые допускают программирование в системе (непосредственно на плате устройства) и имеют возможность аппаратной эмуляции выводов с открытым коллектором. Синтез последовательностного элемента выполняется в системе автоматизированного проектирования (САПР) MAX + PLUS II.

Известны достоинства программируемых логических интегральных схем. При создании специализированных логических устройств разработчик не ограничен возможностями имеющейся в его распоряжении элементной базы: для большинства современных ПЛИС имеются библиотеки, содержащие всё необходимое – от простейших логических элементов до микропроцессоров. Пользователь без посторонней помощи имеет возможность многократно корректировать схему устройства, не внося изменений в печатный монтаж, а исключение значительного числа деталей, размещённых на печатной плате, позволяет существенно уменьшить габариты аппаратуры по сравнению с аналогичными устройствами, реализованными на традиционных БИС.

Описание проекта, т.е. задание программы работы устройства автоматики, может производиться тремя путями в зависимости от выбора проектировщика. Первый способ – программирование на языке символов в графическом редакторе Graphic Editor, где рисуется принципиальная схема цифрового устройства с помощью условных графических обозначений (УГО). Второй путь – запись программы в текстовом редакторе Text Editor на языках описания [7] цифровых устройств (Altera HDL, Verilog HDL, VHDL). Наконец, возможно задание элементов или схемы в целом в виде временной диаграммы, созданной в сигнальном редакторе Waveform Editor. Таким образом, может использоваться как структурное описание модуля в виде совокупности взаимосвязанных компонентов, так и поведенческое описание, когда задается алгоритм работы устройства.

Отметим сразу привлекательность описания устройства тактограммами или временными диаграммами, что, во-первых, не предъявляет каких-либо требований к уровню подготовки проектировщика в области схемотехники или программирования, а во-вторых, является естественным способом пояснения принципов работы устройств для персонала служб релейной защиты и автоматики. Однако временные диаграммы не применяются как основное средство описания устройства РЗА, обычно они служат лишь дополнением к графической схеме. Кроме того, специалисты по ПЛИС рекомендуют использовать этот способ для описания устройств и блоков с чётко заданными зависимостями выходных сигналов от входных, т.е. комбинационных устройств, поскольку, по сути, при проектировании устройств на ПЛИС временные диаграммы являются эквивалентом таблиц истинности.

Графический метод основан на использовании УГО элементов (символов) и отличается высокой наглядностью. Он не требует от проектировщика знаний в области программирования, но подразумевает знакомство с

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

основами схемотехники интегральных устройств. При наличии готового структурного описания устройства достаточно просто повторить его в графическом редакторе, при этом могут использоваться как готовые элементы из собственной библиотеки примитивов САПР или родственных систем проектирования (OrCad, P-CAD), так и пользовательские элементы, созданные разработчиком. Недостатком метода является неэффективное использование кристалла в случаях, когда готовый примитив имеет больше функциональных возможностей, чем это необходимо, а также снижение быстродействия из-за увеличения пути прохождения сигнала.

Описание на языках высокого уровня HDL (Hardware Description Language), в частности VHDL и Verilog HDL, требует хорошего владения средствами программирования. Это аппаратно независимые языки, в силу чего проекты, созданные с их помощью, могут быть перенесены с ПЛИС одной фирмы на микросхемы других фирм. С использованием языков программирования создаются элементы со свойствами и алгоритмами функционирования, отсутствующими в стандартных библиотеках. В САПР MAX + plus II может использоваться AHDL (Altera HDL) – аппаратно зависимый язык, созданный специально для ПЛИС фирмы "Altera". Ориентация языка на конкретные ПЛИС позволяет учесть и полностью использовать все преимущества и особенности архитектуры "Altera". В то же время он проще упомянутых выше языков и быстрее осваивается.

Выбор способа описания проекта оказывает существенное влияние на качество конечного результата и время проектирования. Комбинированный подход – создание блоков путём программирования и сборка устройства в графическом редакторе, сочетает наглядность графического метода и эффективность языков программирования.

Отбросим сразу описание временными диаграммами вход/выход, поскольку для последовательностного элемента оно неприемлемо из-за неоднозначной зависимости выходных сигналов устройства от входных. Создадим графическое описание ПЛЭ с именем SEQ из типовых элементов. Для этого в общем меню программы выбираем графический редактор (Graphic Editor), через меню File/Save As записываем в рабочую папку проекта файл seq.gdf, связываем имя проекта с именем текущего файла командой File/Project/Set Project to Current File. Пользуясь библиотекой примитивов max2lib\prim и командой Enter Symbol (добавить символ), выкладываем на рабочее поле проекта элементы 2И-НЕ (nand2) и 3И (and3), узлы входа (input) и выхода (output). Присваиваем выходам имена y1, y2, входам имена x1, x2 и начальный уровень логического нуля GND взамен предустановленного уровня логической единицы VCC (рис.2).

Связав входы и выходы символов, сохраняем схему в файл seq.gdf. Выполняем компиляцию проекта командой Compiler/Start – при отсутствии ошибок или замечаний проект готов к использованию: автоматически создан файл прошивки seq.pof для программирования микросхемы. Чтобы схему можно было использовать в составе других устройств автоматики, необходимо также создать для неё УГО (символ) в виде файла с расширением sym, что выполняется командой File/Create Default Symbol.

Моделируем поведение элемента при заданных сигнальных последовательностях на входах. Из общего меню САПР вызываем сигнальный редактор (Waveform Editor), командой File/End Time определяем конечное время процесса моделирования 11 с, командой View/Time Range – границы просматриваемого интервала 0–11 с, с помощью опции Options/Grid Size устанавливаем шаг временной сетки 0,5 с. Двойным щелчком левой кнопки мыши в поле Name (рис.3,*а*) или через контекстное меню вызываем диалоговое окно Insert Node (добавить узел), с помощью которого задаём контрольные точки: входы x1, x2 (начальный уровень 0) и выходы y1, y2. Выделяя мышью желаемые интервалы времени, определяем для них высокий (1) или низ-

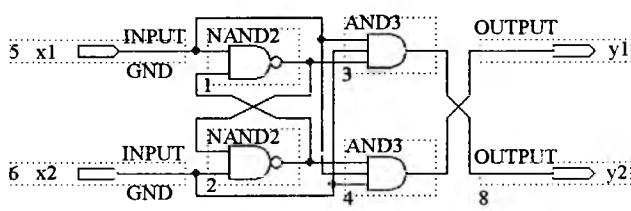


Рис.2

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

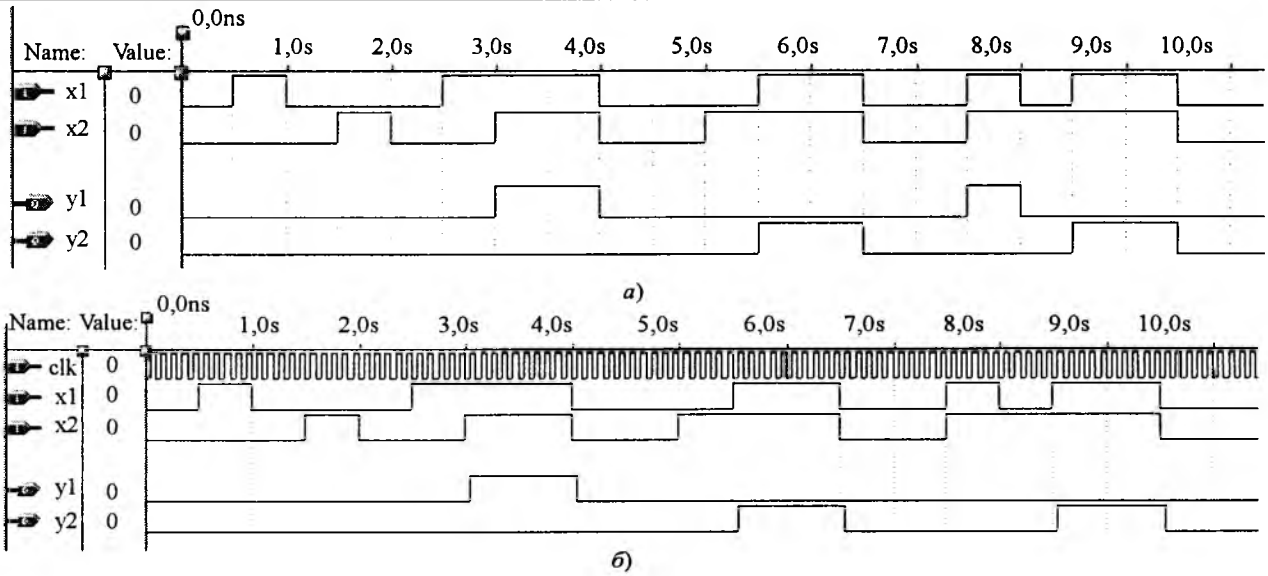


Рис.3

кий (0) уровни переменных x1, x2, сохраняем результат в файл seq.scf. Запускаем процесс симуляции командой Simulator/Start или кнопкой на панели инструментов.

Созданный элемент правильно фиксирует опережение переменной x_1 с уровнем логической 1 относительно переменной x_2 (момент времени 3 с), опережение переменной x_2 с уровнем логической 1 относительно переменной x_1 (момент времени 5,5 с). Однако нельзя считать, что функционирование элемента полностью соответствует алгоритму (2), поскольку имеется неопределённость значения выходной переменной при 7,5 с. Переменные x_1 и x_2 в указанный момент времени принимают значение 1 одновременно, опережение какой-либо из них относительно другой отсутствует, и результат должен быть равен нулю по обоим выходам. Тем не менее, сигнал появляется произвольно на выходе y_1 с задержкой 5 нс, равной времени переключения логического элемента.

Реакция, полученная в САПР, зависит от реальной конфигурации схемы при вписывании в ПЛИС и собственных задержек элементов. Несмотря на идентичность обоих каналов схемы (рис. 2), фактически реализованная компилятором схема соответствует несимметричной программной реализации, пример которой на языке AHDL приводится ниже (файл seq2.tdf).

```
subdesign seq2
(
x1, x2          : input = GND;
y1, y2          : output;
)
variable
    q: node;
begin
    y1 = x1 & x2 & !q;
    y2 = x1 & x2 &  q;
    q = !x1 # x2 &  q;
end;
```

Программа, записанная в текстовом редакторе САПР, содержит обозначения логических операций ! (НЕ), # (ИЛИ), & (И), входам x_1 и x_2 назначены по умолчанию уровни логического нуля GND. Вспомогательная переменная q соответствует отдельному узлу (node), обычно узлы в схемах на ПЛИС используются для хранения промежуточных данных или организации точек контроля. Поскольку логические выражения между словами BEGIN и END обрабатываются одновременно, порядок их записи в файле не важен.

По результатам моделирования представленные графическая схема (seq.gdf) и описание на языке программирования (seq2.tdf) полностью эквивалентны. Поэтому обратимся к описанию моделью конечного автомата, которое является более полным и позволяет определить все вероятные состояния ПЛЭ.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

В языке AHDL конечный автомат (finite state machine) – это переменная, для задания которой должны быть указаны: имя переменной, число разрядов памяти и символическое имя каждого из разрядов (OF BITS), символические имена состояний автомата и их коды (WITH STATES). При минимальном описании достаточно определить имя автомата и имена его состояний, в этом случае компилятор автоматически выбирает разрядность блока памяти и коды состояний. Конечный автомат может иметь три управляющих входа. Это CLK – вход тактового сигнала (переход по фронту), RESET – вход асинхронного сброса автомата по переходу к логической единице, ENA – вход разрешения работы автомата (активный уровень 1). Из них обязательным является лишь вход CLK, на остальных неиспользуемых входах автоматически генерируется сигнал с уровнем, обеспечивающим нормальную работу автомата.

В зависимости от способа формирования выходных сигналов возможны две модели конечных автоматов. Это автомат Мура, у которого выходные сигналы определяются только текущим состоянием автомата, и автомат Мили, у которого выходные сигналы зависят и от текущего состояния автомата, и от набора входных переменных. Сформируем в текстовом редакторе описание элемента Seqand, реализующего ПЛФ в виде автомата Мура со следующими состояниями: zero – исходное состояние; mode 1 – фиксация появления первого входного сигнала; mode 2 – фиксация появления второго входного сигнала; one – рабочий сигнал на первом выходе; two – рабочий сигнал на втором выходе.

```
subdesign seqand
% автомат Мура – выход зависит только от
                 состояний %
(
x1, x2, clk          :input;
y1, y2               :output;
)
variable
  fsm:        machine with states
          (zero, mode1, one, mode2, two);
begin
    fsm.clk=clk;
table
-- текущее  вход  вход      выход  выход  следующее
-- состояние  1     2        1      2      состояние
   fsm,     x1,    x2   =>  y1,    y2     fsm;
   zero,    0,     0    =>  0,     0,     zero;
   zero,    1,     0    =>  0,     0,     mode1;
   zero,    0,     1    =>  0,     0,     mode2;
   zero,    1,     1    =>  0,     0,     zero;
   mode1,   0,     0    =>  0,     0,     zero;
   mode1,   1,     0    =>  0,     0,     mode1;
   mode1,   1,     1    =>  0,     0,     one;
   one,     1,     1    =>  1,     0,     one;
   one,     1,     0    =>  1,     0,     mode1;
   one,     0,     1    =>  1,     0,     mode2;
   one,     0,     0    =>  1,     0,     zero;
   mode2,   0,     0    =>  0,     0,     zero;
   mode2,   0,     1    =>  0,     0,     mode2;
   mode2,   1,     1    =>  0,     0,     two;
   two,     1,     1    =>  0,     1,     two;
   two,     1,     0    =>  0,     1,     mode1;
   two,     0,     1    =>  0,     1,     mode2;
   two,     0,     0    =>  0,     1,     zero;
end table;
 end;
```

В приведённом описании заданы входы x1, x2, clk и выходы y1, y2, переменная, являющаяся символическим именем конечного автомата fsm: machine with states, и пять её возможных состояний (zero, mode1, one, mode2, two), выполнена подача тактовых импульсов на соответствующий вход конечного автомата fsm.clk = clk. После ключевого слова table расписана таблица истинности (состояний) с заголовком в виде двух строк комментария. В первой исполняемой строке таблицы через запятую перечисляются аргументы и имена функций, разделенные символом =>. Ниже в таком же формате задаются значения аргументов и функций для каждого состояния.

Обратим внимание на то, что в таблице учтена возможность одновременного появления единичных сигналов на обоих входах элемента в исходном состоянии (zero) и запрещено формирование выходных сигналов в этом случае. Как следствие, результат моделирования работы элемента (рис.3,*б*) к моменту 7,5 с отличается от реакции при графическом описании проекта (рис.3,*а*), когда в аналогичной ситуации появлялся сигнал на первом выходе (y_1 = 1). Для последующего использования описание сохраняется в файл с расширением TDF, компилируется и снабжается УГО в виде файла типа SYM.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Предпочтительную форму выполнения ПЛФ выбирает разработчик с учётом допустимости входных комбинаций переменных. Несомненно, описание конечным автоматом является более полным, хотя и более сложным. К недостаткам такого описания можно отнести обязательное наличие тактового сигнала, т. е. синхронное исполнение автомата, что несущественно, если проектируемое устройство содержит любые элементы задержки сигнала, также нуждающиеся в тактовых импульсах. Кроме того, формирование выходного сигнала здесь смещено во времени к моменту появления фронта тактового импульса, тогда как при первых двух формах описания задержка срабатывания элемента, зависящая от внешних факторов, практически отсутствовала. Наконец, при описании конечным автоматом менее эффективно используются логические вентили микросхемы.

Простым, но характерным примером применения ПЛФ в устройствах системной автоматики является пусковой орган (ПО) автоматики включения резервного питания (АВР), предназначенный для подстанций ответственных потребителей с двигательной нагрузкой [8]. Взяв его за основу, выполним целиком в виде единичной ПЛИС логическую часть устройства (рис.4).

Элементы сопряжения с объектом (на рис.4 не показаны) включают: на входе – согласующие трансформаторы и формирователи прямоугольных импульсов, которые преобразуют напряжения U_1 и U_2 рабочего и резервного источников питания в логические переменные x1 и x2; на выходе – исполнительные органы в виде транзисторов с малогабаритными реле. Конструктивно устройство выполнено в два яруса: нижний ярус образуют согласующие трансформаторы, выходные реле и стабилизированный блок питания ~220/=5 В, размещённые непосредственно на цоколе, верхним ярусом является печатная плата с входными пороговыми элементами, выходными транзисторными каскадами и разъёмом под ПЛИС.

Для построения устройства задаём в САПР MAX+plus II имя проекта LIS01 командой File/New и выбираем графический редактор, сохраняя графический файл lis01.gdf в папке проекта. Командой Assign/Device задаём серию (Device Family) и конкретный тип микросхемы (Device), имеющийся в наличии, например, EPM7032SLC44-10. Посредством окна Enter Symbol вызываем на рабочее поле: из рабочей папки – символы созданного нами ранее последовательностного элемента в более простом исполнении (файл seq.sym), из библиотеки готовых примитивов САПР – символы входов (input), выходов (output), элементов 2ИЛИ (or2), НЕ (not), D-триггеров DFF и шины с уровнем логической единицы VCC, из библиотеки макрофункций max2lib\mf – стандартный двоичный счётчик 74393.D-триггеры запоминают сигнал 1 на выходах первого ПЛЭ, счётчик (Counter) предназначен для возврата устройства в исходное состояние с задержкой 0,32 с.

Счётный вход счетчика A1 через элемент ИЛИ включён на обе входные переменные

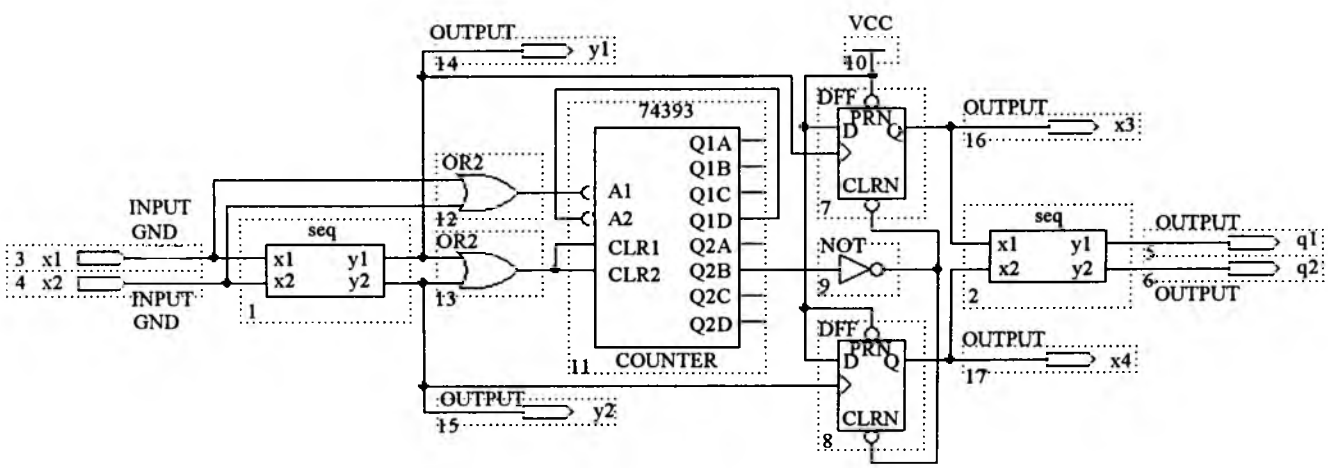


Рис.4

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

x1, x2, входы обнуления CLR через элемент ИЛИ подключены к выходам первого элемента SEQ, выход Q2B для числа $2^5 = 32$ связан через элемент НЕ с входом CLRN сброса D-триггеров. Дополнительные узлы y1, y2, x3, x4 введены для контроля правильности функционирования и в окончательном варианте могут быть исключены. После компиляции проекта можно проверить распределение выводов по ножкам (Pins) микросхемы опцией Floorplan Editor и, при необходимости согласования с печатной платой, произвести коррекцию через меню Assign/Pin-Location-Chip. Перенос проекта в микросхему осуществляется с помощью специального загрузочного кабеля, например ByteBlaster (MV), подключаемого к порту LPT компьютера (его схема приведена в [6]), после чего микросхема устанавливается в разъём на печатной плате. Для прошивки выбирают из общего меню САПР опцию Programmer с указанием типа загрузочного кабеля.

Логическое выражение, описывающее поведение ПО АВР, базируется на ПЛФ

$$q_1 = \overrightarrow{x_3}x_4 = \overline{\overrightarrow{x_1}x_2D^{\downarrow}}\left(x_1\overrightarrow{x_2}D^{\downarrow}\right);$$

$$q_2 = x_3\overrightarrow{x_4} = \left(\overrightarrow{x_1}x_2D^{\downarrow}\right)\overline{x_1\overrightarrow{x_2}D^{\downarrow}}.$$

Рассмотрим работу пускового органа АВР. При исчезновении питающего напряжения первого источника (рис.5) синхронные электродвигатели (СД) продолжают по инерции вращаться, генерируя остаточное напряжение U_1, которое из-за снижения частоты вращения постепенно запаздывает во времени относительно резервного напряжения U_2.

Импульсы x1 и x2, нормально следующие в противофазе, начинают совмещаться, причём с опережением переменной x1. В силу этого формируется последовательность импульсов возрастающей длительности на выходе y1 первого элемента SEQ, D-триггер первого канала переключается и образует на своем выходе непрерывный сигнал x3 = 1. С достижением разностью фаз напряжений значения 180° уже на выходе y2 появляется последовательность импульсов убывающей длительности, поскольку теперь при совпадении входных импульсов опережающей оказывается переменная x2. В момент срабатывания (0,4 с) второго D-триггера второй ПЛЭ SEQ формирует сигнал q1 = 1, так как на его входах имеются обе переменные: x3 (опережающая) и x4. Этим сигналом отключается выключатель первого ввода подстанции, от чего включается секционный выключатель (0,6 с), на неисправную секцию подаётся резервное напряжение. Переменные x1 и x2 формируются опять поочередно, счётчик перестает обнуляться и начинает отсчёт входных импульсов, следующих с периодом 10 мс. Ещё через 0,32 с на его выходе Q2B появляется 1 и возвращает пусковой орган в исходное состояние. Время срабатывания ПО АВР зависит от инерции агрегата электродвигатель – приводимый механизм.

Основные параметры опытного образца: порог срабатывания по напряжению $(0{,}1–0{,}2)U_{ном}$, собственное время срабатывания не более 5 мс, время удержания выходного сигнала не менее 0,32 с. В производственном эксперименте с выбегом СД 630 кВт аммиачного компрессора полный перерыв питания составил 0,4 с, максимальный бросок тока несинхронного включения электродвигателя не превышал $8I_{ном.дв}$, длительность качаний двигателя после подачи резервного напряжения 0,68 с,

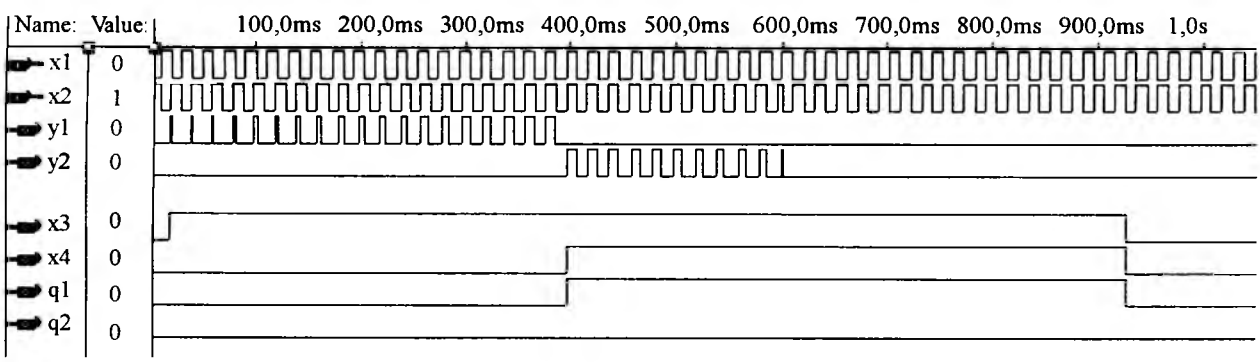


Рис.5

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

напряжение секции сохранялось на уровне не менее $0{,}79U_{ном}$ в течение всего процесса переключения, обеспечивая удержание в работе низковольтной технологической аппаратуры. Собственные времена отключения и включения установленных на подстанции выключателей равны соответственно 0,08 и 0,11 с.

Выводы

Использование ПЛФ позволяет не только упростить запись логических выражений, но и попутно унифицировать структуру разных устройств автоматики. При реализации на ПЛИС последовательностный элемент наиболее полно соответствует ПЛФ ОПЕРЕЖЕНИЕ в случае его описания конечным автоматом, однако при этом менее эффективно используются логические вентили микросхемы и образуется задержка, зависящая от внешних факторов. Более простое, экономичное и быстродействующее выполнение ПЛФ с помощью графического описания допускает наличие недопустимых комбинаций входных воздействий, что следует учитывать при проектировании устройства автоматики в целом.

Список литературы

1. **Бородеико В.А., Поляков В.Е.** Пусковой орган автоматического ввода резерва для комплексной нагрузки // Электричество. 1982. № 5. С. 13–18.
2. **Бородеико В.А.** Описание последовательностных автоматов на основе аппарата комбинационной логики // Электрооборудование промышленных предприятий. Горький: Изд-во ГПИ, 1985. С. 119–123.
3. **Поляков В.Е., Жуков С.Ф., Проскурин Г.М. и др.** Теоретические основы построения логической части релейной защиты и автоматики энергосистем. М.: Энергия, 1979.
4. **Барзам А.Б.** Системная автоматика. М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. **Алексеев О.П., Казанский В.Е., Козис В.Л. и др.** Автоматика электроэнергетических систем. М.: Энергоиздат, 1981.
6. **Стешенко В.Б.** ПЛИС фирмы "Алтера": элементная база, система проектирования и языки описания аппаратуры. М.: Додека-XXI, 2002.
7. **Антонов А.П.** Язык описания цифровых устройств AlteraHDL. Практический курс. М.: ИП РадиоСофт, 2002.
8. **Бородеико В.А., Поляков В.Е.** О выборе принципа действия пусковых органов АВР // Промышленная энергетика. 1981. № 5. С. 34–37.

Бородеико Виталий Анатольевич – профессор кафедры "Автоматизация и управление" Павлодарского ГУ (Казахстан), канд. техн. наук. Окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института в 1968 г. Защитил диссертацию по теме "Разработка и исследование пусковых органов включения резервного питания на подстанциях с двигательной нагрузкой" в 1982 г. в УПИ.

Применение компьютерных сетевых средств для построения систем управления технологическими объектами

РОСЛЯКОВ А.А.

Рассмотрены возможности применения в качестве среды передачи данных в системах управления компьютерных сетей Ethernet. Приведён пример построения системы управления с применением Ethernet и рассмотрены её преимущества над традиционными системами.

Reviewed the possibility of using Ethernet technology instead of the proprietary fieldbuses for building the control systems. An example of implementation of Ethernet-based control system and comparison to classical systems are given.

Современные электротехнические устройства и системы становятся все более и более сложными, технологичными и интеллектуальными. На сегодняшний день стало правилом построение систем управления технологическим объектом на базе компьютерной техники. Однако часто это связано с некоторыми техническими трудностями, в частности, при автоматизации электропечей существенным является отличие параметров ок-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ружающей среды в месте установки управляющей аппаратуры. Основным фактором здесь является нагрев и последующее остывание зоны, в которой располагается управляющая аппаратура, что обычно приводит к выходу из строя мониторов на базе электронно-лучевых трубок и прочей не адаптированной аппаратуры. Решением этой проблемы является применение промышленного компьютера, что вызывает повышение цены и ограничение функций интерфейса пользователя.

В случае, когда объект управления имеет значительные габариты, а управляющие элементы и датчики расположены на значительном удалении друг от друга, систему управления разбивают на несколько подсистем, каждая под управлением отдельного компьютера, и обеспечивают связь между ними посредством той или иной полевой шины, что также не сказывается положительно на стоимости.

Однако появившиеся в последнее время технические решения позволяют изменить подход к проектированию систем управления технологическими объектами путём замены специализированных информационных каналов сетью Ethernet. При этом наблюдается существенное улучшение характеристик инфраструктуры передачи данных, а также функциональность системы в целом. Кроме того, все эти решения позволяют повысить потребительские качества уже существующих систем управления, в том числе и на базе цифровых интерфейсов.

Применение сети Ethernet позволяет практически неограниченно увеличить диаметр управляющей системы, обеспечить полноценный дистанционный доступ к оборудованию без применения сложных средств, которые увеличили бы стоимость конечного изделия. Список устройств, применяемых в системах управления и поддерживающих в качестве среды передачи Ethernet, включает практически весь набор от промышленных микроконтроллеров до отдельных датчиков.

Сравнительные характеристики некоторых наиболее распространённых магистралей приведены в таблице.

Практически все указанные магистрали и шины рассчитаны на малые расстояния передачи данных, а для передачи на большие расстояния необходимо либо искать новые принципы передачи специфического трафика, либо применять уже имеющиеся альтернативные технологии [1]. При переходе на микроконтроллерные элементы становится привлекательным использовать компьютерные сети (Ethernet) из-за их широкой распространённости и практически обязательного наличия на территории автоматизируемого предприятия, а высокая пропускная способность при значительных расстояниях передачи данных позволяет заменить ими традиционные каналы передачи управляющей информации.

Применение сетей Ethernet возможно как при создании новых систем управления, так и при осуществлении перехода на новый уровень масштабирования уже существующих систем. Такие технологии, как DeviceNet и ControlNet, применяемые в промышленности, были адаптированы для передачи информации посредством сетей Ethernet и стека протоколов TCP/IP. Появившаяся в результате технология Ethernet/IP [2] позволяет передавать данные протоколов полевых шин (fieldbus) поверх протоколов TCP/IP, т.е. для переноса существующих систем управления, построенных по технологиям DeviceNet и ControlNet, на более масштабные объекты управления необходимо только заменить передающие устройства на Ethernet-совместимые, а программное обеспечение и алгоритмы управления остаются прежними, как и весь набор устройств ввода/вывода.

Так как при автоматизации промышленных объектов чаще других используется шина RS-485, то для модернизации таких систем

Название	Скорость передачи данных	Максимальное расстояние передачи	Среда передачи
GPIB (КОП)	до 8 Мбайт/с	20 м	Специальный кабель
VME, VXI	до 360 Мбит/с	< 1 м	Специальная магистраль
Последовательная шина	до 115 кбит/с	≤ 1200 м	2 витые пары
DeviceNet	до 500 кбит/с	≤ 500 м	Специальный кабель

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

удобно использовать технологии VxCOM и XServer или аналогичные им. Первая из них позволяет посредством сети Ethernet создавать виртуальную сеть на базе интерфейса RS-232/485, т.е. можно, используя имеющееся программное обеспечение для устройств с интерфейсом RS-232/485, построить крупномасштабную систему управления на базе сети Ethernet, значительно увеличив допустимое расстояние между управляющим компьютером и периферийными устройствами, пропускную способность и сокращ[illegible] число требуемых проводов.

Более функциональна технология XServer. Подключение сегментов управляющей сети, в том числе и существующей, построенной на базе RS-232/485 к удалённому центру управления или другим сегментам этой сети, соединённым между собой каналом Ethernet легко осуществимо посредством несложных модификаций программного обеспечения контроллеров. За счёт того, что протокол XServer позволяет передавать пользовательские команды и данные без необходимости изучения принципов программирования приложений для TCP/IP, в распоряжение разработчика поступает весь необходимый инструментарий и время разработки существенно сокращается.

Примечателен тот факт, что в 1998 г. был принят единый стандарт промышленного интерфейса: IEC 61850 [3]. Вместо выбора между конкурирующими шинами связи было достигнуто соглашение об использовании Ethernet в качестве общей шины. Поэтому сейчас имеются все основания для применения в сфере автоматизации именно сети Ethernet.

Одной из проблем при использовании существующей сети предприятия для передачи управляющего трафика является возможность возникновения ситуаций, когда критичный по времени передачи трафик может быть передан с задержкой. Группой исследования задач межсетевого обмена IEEE802.1 недавно был опубликован улучшенный стандарт IEEE 802.1p "сопровождение классов трафика и динамическая фильтрация множественных получателей" (Traffic Class Expedition and Dynamic Multicast Filtering). Этот стандарт даёт контроль прохождения трафика (установки приоритетов пакетов), что может помочь обеспечить передачу критических по времени данных по локальной сети и передачу ко многим приемникам (multicasting) в среде коммутируемого или маршрутизируемого Ethernet. Стандартный Ethernet не включает в формат пакета информацию качества облуживания (QoS – quality of service), однако этот факт был учтён в стандарте IEEE 802.1Q, который определяет в пакете три бита приоритета в составе поля управления [4].

Таким образом, можно сформировать следующие общие рекомендации для построения распределённой системы управления на базе сети Ethernet:

1. В качестве среды передачи данных следует использовать Ethernet, основанный на коммутаторах (switched Ethernet). Применение повторителей (hub) нежелательно, так как при этом возникает серьёзное снижение пропускной способности и время задержки передачи пакетов не поддаётся предсказанию.

2. Так как время задержки передачи сигнала мало, для синхронизации съёма информации можно использовать широковещательный или многоадресный (multicasting) пакет, который будет получен всеми контроллерами практически одновременно (задержка получения пакета 19 мкс на каждый коммутатор на пути сигнала).

3. В случае применения в составе сети участков глобальной сети необходимо предусмотреть средства, позволяющие сохранить работоспособность оборудования в случае задержек связи.

Пример построения системы управления на базе сети Ethernet и классической технологии

Для сравнения систем управления, построенных на базе сети Ethernet и по классической схеме, можно рассмотреть технологическую установку для сжигания сажи в вакууме, разработанную в ОАО "ВНИИЭТО". Было создано два варианта системы управления – на классической базе (контроллеры-регуляторы типа "Ремиконт", "Минитерм" и т.д.) и на основе промышленных микроконтроллеров с Ethernet интерфейсом фирмы ICP DAS.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

При предварительном сравнении таких систем управления получается, что удорожание конструкции может составить около 10–15%, а функциональные возможности системы, построенной на новой элементной базе, значительно расширяются. Как побочный эффект появляется возможность создать систему с дистанционным доступом, так как сеть Ethernet может представлять сеть предприятия или глобальную сеть. При этом можно использовать расширенные диагностические средства за счёт применения математической обработки первичных данных, полученных от локальной части системы управления, на компьютере пользователя.

Первый вариант системы управления имеет в своём составе контроллер "Минитерм-400" – для регулирования температуры (стоит заметить, что температура для индикации берётся с другой термопары нежели для регулирования), электронный вакуумметр, автоматический регистратор ФЩЛ 501-15 для ведения протоколирования температуры и вакуума. Обеспечивается отображение давления вакуума, температуры. Автоматическое управление осуществляется только нагревательным элементом, а вакуумная система управляется вручную. Вся аппаратура управления собрана в шкаф, размещаемый рядом с установкой. Стоимость этой системы 88 тыс. руб.

Второй вариант использует только одну термопару и для регулирования, и для отображения оператору температуры, вакуумметр того же типа (так как он в стандартной комплектации обладает цифровым выходом), кроме того есть возможность заранее составить программу режимов регулятора температуры и вакуума (управление вакуумными устройствами в этом варианте системы осуществляется также автоматически). Система, помимо функций управления, обеспечивает диагностику нагревательного элемента, регулятора мощности, трансформатора, термопар и вакуумной арматуры. Ведётся протоколирование температуры, давления вакуума, тока на нагревателе. Стоимость этой системы 86 тыс. руб.

Функционально система содержит две части – локальную аппаратуру управления на стороне оборудования, выполняющую задачи регулирования и диагностики состояния исполнительных механизмов, и управляющий компьютер оператора. Локальная аппаратура получает от компьютера оператора параметры требуемых режимов и время выполнения задания. При этом пропадание связи между двумя уровнями во время выполнения задания не влияет на работу. Если связь не восстановлена после завершения задания, происходит отключение исполнительных механизмов и безаварийный выход из рабочего режима. В случае возникновения отказа какого-либо из исполнительных механизмов также происходит автоматический выход из рабочего режима.

Управление локальной аппаратурой и связь с компьютером оператора осуществляются посредством промышленного микроконтроллера ICP DAS 7188XE. Ввод текущего значения тока в нагревателе осуществляется через быстрый 12-битный АЦП, размещённый на плате расширения микроконтроллера и соединённый через быструю параллельную шину с контроллером. Ввод значения напряжения с измерительного моста сопротивлений в режиме диагностики осуществляется через модульный 24-битный АЦП, соединённый с микроконтроллером по шине RS-485 По этой же шине осуществляется связь с вакуумметром и модулями дискретного ввода/вывода. Схема информационных соединений системы управления показана на рисунке.

Для передачи первичной информации и управляющих воздействий системы используются быстрая локальная шина контроллера и сеть RS-485, а для связи микроконтроллера с управляющим компьютером – сеть Ethernet. При таком подходе сохраняются преимущества использования традиционных промышленных модульных микроконтроллерных компонентов, соединённых простой шиной RS-485 при небольших расстояниях передачи (в пределах одного каркаса), а для соединения удалённых на большие расстояния компонентов использование Ethernet позволяет, используя компактный кабель ("витую пару"), обеспечить высокоскоростное соединение при сокращении затрат на разворачивание магистрали.

Таким образом, при переходе на промышленный микроконтроллер с интерфейсом Ethernet и удалённым управляющим компью-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

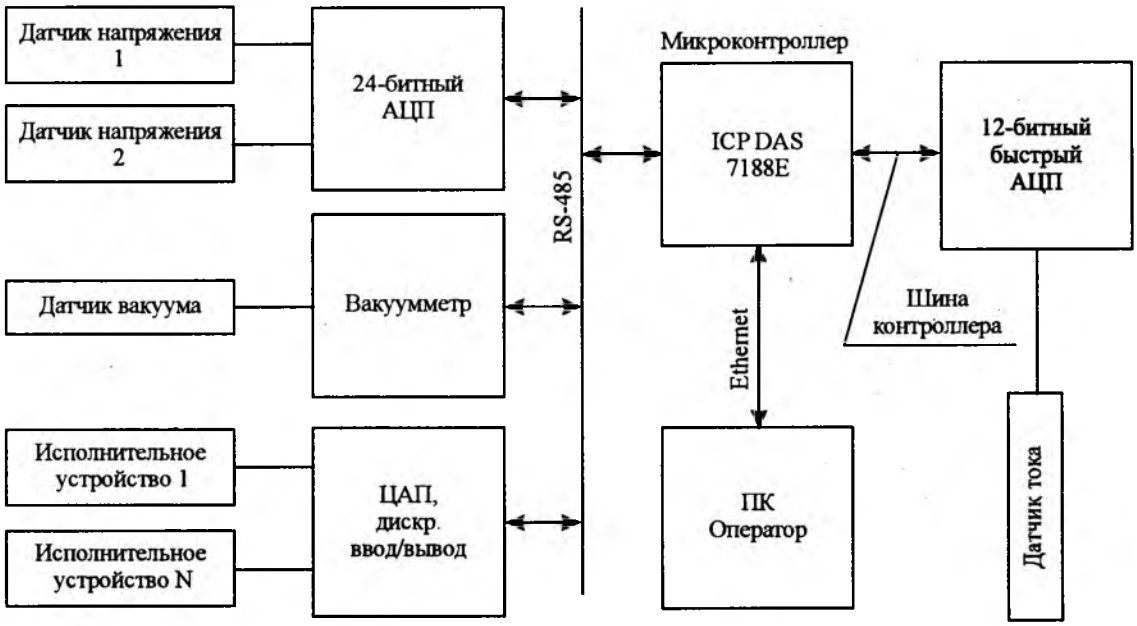


Схема информационных соединений

тером стоимость системы управления незначительно снизалась, а функциональность расширилась. Если сравнивать с системой управления на базе промышленного компьютера будет так же наблюдаться снижение стоимости системы за счёт применения связки микроконтроллер – Ethernet – персональный компьютер вместо промышленного компьютера (ориентировочно 200$ + 500$ вместо 1500$).

Выводы

1. Переход на полностью цифровые системы управления завершился практически во всех отраслях техники, и автоматизация охватывает весь объект, что приводит к необходимости организации протяжённых линий передачи цифровой информации.

2. Опыт использования сети Ethernet в качестве стандартной цифровой шины в некоторых областях техники даёт основание для применения её и в электротехнике.

3. Появление простых инструментов разработки средств управления, использующих в качестве шины передачи данных сетей Ethernet, позволяет произвести переход на эту сеть с минимальными затратами. Дополнительные преимущества, появляющиеся при этом трудно реализовать другими средствами (отдаление объекта управления от оператора на значительные расстояния – фактически переход к системам управления с удалённым доступом в их классическом понимании, является побочным эффектом и не требует дополнительных затрат для своей реализации). В итоге стоимость такой системы может даже снизиться за счёт применения стандартных вычислительных средств вместо дорогостоящих специализированных, а набор сервисных функций может увеличиться благодаря более квалифицированному персоналу.

Список литературы

1. **LeBlanc C.** The future of industrial networking and connectivity Dedicated Systems magazine, March 2000.

2. **General** Recommendations for Ethernet/IP developers version 2.00 January 2005. http://www.odva.org/10_2/03_events/New-EtherNet/PUB00100_General_Recommendations for EtherNetIP Developers V2.0.pdf

3. **Andersson L., Brand K.P., Reinhardt P.** IEC 61850 meets Industrial IT // ABB Review. 2003. № 3. P. 37–43.

4. **IEEE 802.**1Q. Standard for local and Metropolitan Area Networks: Virtual Bridged Local Area Networks, 1998.

Росляков Андрей Александрович – начальник отдела программного и технического обеспечения ОАО "ВНИИЭТО", магистр электротехники и электротехнологий. В 2002 г. окончил кафедру ЭКАО МЭИ (ТУ), ИЭТ. В 2005 г. окончил аспирантуру МЭИ (ТУ), подготовил кандидатскую диссертацию по теме "Разработка и исследование средств диагностики и управления электротехнического комплекса".

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Исследование свойств полиэтилена в условиях атмосферного старения

МАРФИН Н.И.

Проведён анализ изменения свойств полиэтилена высокого давления в условиях атмосферного старения.

The analisys of a modification of properties of polyethelene of high pressure in conditions of atmospheric aging in conducted.

На физико-механические свойства изделий из полиэтилена, используемых в радиоустройствах различного назначения, при подключении антенных устройств, в телефонной и радиосети, в электрических сетях [1], в бортовых системах автомобилей, при консервации техники связи и АСУ способом зачехления или комбинированным способом, в быту оказывают влияние различные атмосферные факторы. Сюда относятся, в первую очередь, солнечная радиация, атмосферная влажность, а также значительные колебания суточной и годовой температуры воздуха. Каждый из этих факторов вызывает в полиэтилене различные химические и физические процессы старения, которые приводят к необратимому изменению физико-механических свойств полимера. Все эти факторы, как правило, действуют одновременно.

Объектом исследования служил полиэтилен высокого давления, нестабилизированный (МРТУ-6-05-889-72). Образцы готовили к испытаниям в условиях атмосферного старения (с открытой экспозицией); в условиях комнаты административного здания (в плотной чёрной бумаге в ящике стола – закрытая экспозиция); в условиях атмосферного старения под толщей (2,5–3 мм) стеклянного колпака (при рассеянном свете). Для района, где были проведены исследования (г. Полтава), характерны следующие метеоусловия: среднемноголетняя температура +7,2°С, количество осадков (среднемноголетнее) 502 мм, сумма среднечасовых напряжений солнечной радиации 7,48 кал × мин / см^2 [2]. До полугода испытания проводили по истечению каждых 2 мес с момента изготовления образцов, затем до 2,5 лет через каждые 6 мес.

В результате экспериментов установлено, что образцы после двухлетнего хранения в конверте из плотной черной бумаги (закрытая экспозиция) не изменили своего внешнего вида и цвета. Микроструктура изделий сохранилась в исходном состоянии, и имеет достаточно мелкую зернистость. В результате механических испытаний образцов установлено, что относительное удлинение и прочность полиэтилена снижаются незначительно (до 1%). Заметной разницы в механических характеристиках образцов, пигментированных различными цветами, не обнаружено.

При внешнем осмотре образцов, подвергшихся световому старению в атмосферных условиях (открытая экспозиция), было установлено, что те из них, которые имели натуральный цвет, приобрели окраску от светло-серой (после 1 года) до светло-коричневой (после 2 лет), местами до тёмно-коричневой (после 2,5 лет). Светло-зелёные образцы приобрели тёмно-серый цвет, светло-розовые – от светло-серого до светло-коричневого, зелёные и синие заметного изменения окраски не имели. Поверхность красных образцов стала матово-белой.

Анализ микроструктуры образцов, подвергнутых световому облучению с открытой экспозицией в течение 1 года, показал, что поверхность образца покрыта порами от мельчайших до крупных, что свидетельствует о выделении при солнечном облучении газообразных продуктов. Особенно интенсивна такая картина на микроструктуре образцов, облучённых солнцем более 2 лет. Упорядоченность зёрен, присущая микроструктуре образцов, не подвергшихся атмосферному старению, отсутствует. Поверхность покрыта

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

трещинами достаточно крупных размеров. При анализе микроструктуры образцов, подвергнутых атмосферному старению в течение 24–30 мес, видно, что образование трещин и пор идет достаточно интенсивно, количество их и размеры увеличиваются, трещины теряют прямолинейность, превращаясь в извилистые продолговатые раковины. Очевидно, что их образованию и увеличению способствует атмосферная влага, проникающая внутрь образца. Испытание образцов, подвергнутых атмосферному старению с открытой экспозицией, показало также, что прочность и относительное удлинение полиэтилена при длительном старении (более 2 лет) значительно уменьшаются (до 25–30%). После светового старения с открытой экспозицией образцов с различной пигментацией (розовая, синяя, зелёная, натуральная) их механические характеристики снижаются практически одинаково, т.е. пигментация полиэтилена не влияет на его прочностные качества.

Представляют интерес результаты наблюдений за образцами, подвергаемыми световому старению в условиях рассеянного света (под стеклянными колпаками). После двухлетнего пребывания образцов под стеклянными колпаками пигментация изменяется незначительно. Образцы тёмно-зеленые и синие внешне практически не изменились. Поверхность образцов светло-розового и светло-зелёного цветов стала светло-серой. Внешний осмотр образцов позволил сделать вывод, что стекло, хотя и является хорошим оптическим фильтром для ультрафиолетовой составляющей солнечных лучей, не полностью защищает пигмент образцов полиэтилена от светового воздействия. Прочность образцов подвергшихся старению в условиях рассеянного света, снижается через 2,5–3 года до 20%, а относительное удлинение – до 25–35%.

Выводы

1. При отсутствии светового воздействия на полиэтиленовые изделия их относительное удлинение и прочность снижаются незначительно. В этом случае нет заметной разницы в механических характеристиках полиэтилена, пигментированного различными цветами.

2. Во всех случаях появление трещин в микроструктуре полиэтиленовых изделий связано со световым воздействием. Это позволяет сделать вывод, что световое облучение – основная причина трещинообразования. При атмосферном воздействии трещинообразование в микроструктуре изделий из полиэтилена идёт интенсивнее, растёт не только количество трещин, но и их размеры, что впоследствии приводит к снижению прочностных характеристик материала и даже полной потери их.

Список литературы

1. **Марфин Н.И.** Строительство линий электропередачи сельскохозяйственного назначения. М.: Энергоатомиздат, 1983.

2. **Матвеева Е.Н. и др.** Старение полиофинов // Пластические массы. 1963. №3.

3. **Марфин Н.И., Коломиец С.И., Полуэктов Л.М.** Исследование свойств полиэтилена в условиях атмосферного старения // 3-я международная научно-техническая конференция. 11-13 сентября 2001г. Одесса: Украинская Академия связи.

Марфин Николай Иванович – доцент Полтавского военного института связи, канд. техн. наук. Окончил Томский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта в 1956.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Химия, механизмы и кинетика старения электроизоляционных целлюлозных материалов

Ч.I. Химия, механизмы и кинетика разложения целлюлозы

АРАКЕЛЯН В.Г.

Первая часть статьи завершает обсуждение теоретических вопросов разложения маслопропитанной целлюлозной электротехнической изоляции выводом кинетических уравнений разложения бумаги как функции температуры, влажности, содержания кислорода, содержания антиоксиданта и кислотного числа. В основе вывода уравнений лежат два механизма распада целлюлозы, один из которых характерен для аморфной части целлюлозы, а другой - для кристаллитной.

Автор полностью опирается на опыт предшествующих исследователей и делает попытку профильтровать, объединить и обобщить полученные ими знания.

The first part of article finishes discussion of theoretical questions of decomposition oil-filled cellulose insulation by a deduction of the kinetic equations of decomposition of a paper as Junctions of temperature, humidify, the content of oxygen, the contents of antioxidant and acid number. Two mechanisms of disintegration of cellulose lay in a basis of a conclusion of the equations. One of which is characteristic for amorphous part of cellulose and another is characteristic for crystalline cellulose.

The author completely bases on experience of previous researchers and makes attempt to filter, to unit and to generalize the knowledge received by them.

Химия разложения целлюлозы

Хорошо известно, что бумага и масло, используемые в трансформаторах, разлагаются с течением времени в зависимости от температуры и присутствия воздуха и воды. Очевидно, что старение бумажного листа связано с химическими изменениями самой целлюлозы. Механизм разложения труден для понимания, и строгого представления о химии протекающих процессов не существует. Зависимость разложения целлюлозы от ряда внешних условий позволила установить, что процесс протекает по одному из следующих путей:

1. *Гидролитическое разложение* (*разложение с присоединением воды*)

Вода и кислоты воздействуют на гликозидную связь (кислородный мостик между глюкозидными кольцами), отщепляя от цепи целлюлозы глюкозу. Бумага атмосферной влажности нормально содержит 7–8% воды по массе. Изоляционная бумага обычно сушится перед использованием, чтобы затормозить этот тип разложения. Тем не менее, с увеличением в изоляционной системе воды за счёт других процессов этот тип реакции активизируется.

2. *Окислительное разложение.*

Целлюлоза окисляется, и конечные продукты реакции окисления находятся в зависимости от природы окислителя, концентрации ионов водорода (p*H*) и температуры. Во всех случаях, направление реакции – это окисление гидроксильных групп до карбонильных (образование альдегидов) и карбонильных – до карбоксильных (образование кислот). В этом химическом процессе образуется вода. Соседство карбоксильных или карбонильных групп ослабляет гликозидную связь и может привести к разрыву цепи и дальнейшему окислению.

3. *Термическое разложение.*

Нагревание целлюлозы в отсутствие воды и окислителя в пределах 200°C приводит к разрыву гликозидных связей и раскрытию глюкозидных колец. Продуктами такого термического воздействия являются глюкоза, вода, окислы углерода и органические кислоты. Основными в количественном отношении продуктами разложения при этом являются вода и окислы углерода.

Присутствие воды и кислорода определяет и направление дальнейшего химического превращения образующихся из целлюлозы соединений. В присутствии избытка кислорода основным образующимся окислом углерода является двуокись. В случае преобладания гидролитического механизма распада целлюлозы часть образовавшейся глюкозы (или, точнее, её дегидратированной формы – 1,6-ангидро-β-*D*-глюкопиранозы, левоглюкозана) получает возможность за счёт дегидратации превратиться в соединения фуранового ряда, а другая часть окисляется до двуокиси углерода и воды.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

4. *Образование фурановых соединений.*

Количество образовавшейся глюкозы могло бы указать на степень разложения бумаги, но растворимость глюкозы в минеральном масле очень мала. Образовавшаяся глюкоза, в основном, остается связанной в полимерной структуре бумаги. Под влиянием влаги и кислот глюкоза превращается в производные фуранового ряда. Природа конечных продуктов зависит от условий протекания химических реакций. В конечном счёте, фурфурол, 5-гидроксиметилфурфурол, фурфуриловый спирт, 5-метилфурфурол, 2-ацетилфуран и 2-фуранкарбоновая кислота – вероятные основные продукты химических реакций разложения этого направления, хотя детальный хроматографический анализ [1] в варианте ВЭЖХ показал наличие, кроме вышеперечисленных, и 3-фуранкарбоновой кислоты, и метанола, и монометилового эфира гидрохинона, и бензальдегида. Другим источником фурфурола является гемицеллюлоза, составляющая до 6–7% сухой массы крафт-бумаги[1]).

По мере увеличения полярности фуранового соединения его растворимость в минеральном изоляционном масле снижается. Наиболее растворимыми в минеральном масле являются фурфурол и метилфурфурол. Фуранкарбоновая кислота практически нерастворима в масле и в воде. Адсорбция водорастворимых фурановых соединений (все из вышеперечисленных, кроме ацетилфурана и фуранкарбоновых кислот) на бумаге увеличивается с увеличением влагосодержания бумаги. Растворимость фурановых соединений в масле влияет на образование конечных продуктов, смещая равновесие и направление химических реакций в сторону образования более растворимых в масле соединений. За счёт растворения в масле образовавшиеся продукты покидают зону реакции и способствуют развитию этого направления химических процессов. Нерастворимые в масле продукты реакции остаются в бумаге до того момента, пока под действием внешних факторов не превратятся в более растворимые. Практические наблюдения показали, что именно фурфурол образуется в наибольшем количестве.

[1] Гемицеллюлоза (пентозан $(C_5H_8O_4)n$) является исходным продуктом для промышленного получения фурфурола.

Так же как и при сухой перегонке древесины, нет возможности представить реальные химические процессы, происходящие с целлюлозой в электротехническом оборудовании, в виде химических уравнений.

Общее описание процесса разложения целлюлозы

Основная особенность разложение целлюлозы как основного элемента изоляции маслонаполненного оборудования заключается в том, что этот процесс протекает одновременно по двум независимым направлениям. Один процесс реализуется в среде минерального масла, другой – в массе целлюлозы, недоступной для масляной среды. Известно, что основными структурными образованиями бумаги являются кристаллическая целлюлоза (до 70% массы, плотноупакованная часть, доступная для диффундирующих молекул, но недоступная для масляной среды) и аморфная целлюлоза (сравнительно рыхлое образование, более доступное для масла).

Разрыв целлюлозной молекулы приводит к отщеплению звена левоглюкозана. Если разрушаемая молекула целлюлозы находится в среде минерального масла и оторванное звено или несколько звеньев левоглюкозана продолжают свою жизнь в этой инородной, сравнительно сухой и наполненной кислородными и прочими свободными радикалами среде, то жизнь этого объекта закончится развалом до окислов углерода и воды, даже если гликозидное кольцо будет повторно вовлечено в сферу адсорбции массы целлюлозы. То же произойдёт и без предварительного отрыва крайнего звена: воздействие оксирадикалов и прочих свободных радикалов субстрата приведет к образованию карбоксильных групп в крайнем звене, к раскрытию и постепенному разрушению звена до окислов углерода и воды, низших альдегидов и кислот. Отрыв плавающей в масле части цепи молекулы целлюлозы неизбежно приведёт к её полному уничтожению. Очевидно, что этот процесс характерен для пропитанной маслом аморфной части целлюлозы. Именно эти структурные образования первыми воспримут волны энергии, передаваемые молекулами масла (в виде импульсов тепловой энергии или энергии радикалов). Это наиболее незащищенные участки целлюлозы,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

доступные для масляной среды, не усиленные адсорбционными силами. Плавающие в масляной среде концы гликозидных цепей (так называемая, бахрома) принимают на себя воздействие тепловых квантов энергии и "перемалываются" активными радикалами изоляционного масла при воздействии тепла и кислорода в окружении недружественных молекул масла с образованием простейших молекул: воды и газов – окислов углерода, водорода, легких углеводородов C_1 и C_2 (кроме ацетилена). Преимущественной химической реакцией этого направления разложения целлюлозы является термоокислительная деструкция, приводящая к образованию большого количества воды и газов. Доля таких уязвимых участков целлюлозы невелика, и по мере уменьшения количества исходного материала, это направление химической реакции постепенно затухает.

Если разрушаемая молекула целлюлозы находится в кристаллитной массе, куда доступ масла затруднен, то образовавшиеся в результате разрыва цепи концевые звенья, находясь в окружении адсорбированной воды, получают возможность гидролитическим путём раскрыться в линейную структуру и последовательной дегидратацией преобразоваться в соединения фуранового ряда. В случае образования самостоятельной молекулы левоглюкозана при разрыве цепи оторвавшееся звено также остается в сфере адсорбции целлюлозы и, если оно сразу не подверглось более глубокому разложению до газообразных компонентов, то взаимодействует с адсорбированной здесь в большом количестве водой и получает возможность превратиться в фурановое производное, которое из-за большей растворимости лучше сольётся с разнородными молекулами минерального масла, так же, как и они, передавая волны энергии от одного соседа к другому и не воспринимая её. Треть образующихся молекул левоглюкозана имеет такую возможность, но две трети, полученные по этому направлению, перерабатываются в окислы углерода, воду, другие газы и простые соединения. Конкуренция реакций разложения до газов (главным образом, H_2O и CO, а также CO_2 – с участием кислорода) и гидролиза с последующей дегидратацией приводит к образованию H_2O, CO_2 и фурановых соединений (главным образом, фурфурола). Такой процесс более характерен для кристаллита, доступ масла к которому затруднён, а вода свободно проникает диффузионным путём и практически вся остается там в адсорбированном состоянии. Специфика второго направления состоит в существенном увеличении доли гидролитических процессов за счёт сильного увлажнения бумаги, выражающемся в образовании фурановых соединений и, соответственно, снижении количества образующихся газов.

Несмотря на то, что одно направление химического превращения целлюлозы лучше увязывается с бахромой, а другое – с кристаллической целлюлозой, следует подчеркнуть, что направление химического превращения целлюлозы определяется не принадлежностью к структурной группе, а окружающей средой. Далее, имея в виду эту оговорку, исключительно для упрощения будем связывать первый процесс с бахромой, а второй – с кристаллической целлюлозой.

Концепция разрыва цепи в кристаллической целлюлозе

Предполагается [2], что новая целлюлоза абсолютно монодисперсна, поэтому её степень полимеризации, например $СП_0 = 1000$, означает, что все цепи имеют 1000 звеньев. Термическая деградация молекулы целлюлозы приводит к образованию двух цепей со степенью полимеризации $СП_1$ и $СП_2$, и одна из вновь образованных молекул оказывается нестабильной, отщепляя звено левоглюкозана. В конечном счёте

$$СП_0 \rightarrow СП_1 + СП_2 + \text{Левоглюкозан}. \quad (A)$$

Как только началась термическая деградация, целлюлоза теряет свойство монодисперсности, и бумага становится смесью целлюлозных цепей разной длины: $СП_0$, $СП_1$ и $СП_2$. Если осколки молекулы продолжают оставаться в массе целлюлозы, то степень полимеризации такой бумаги

$$СП = \frac{xСП_0 + y(СП_1 + СП_2)}{x + 2y}.$$

Поскольку фактически $СП_1 + СП_2 = СП_0$, то

$$СП = \frac{(x + y)СП_0}{x + 2y}, \quad (1)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где x – число молекул, ещё не подвергшихся разложению; $2y$ – число молекул, образовавшихся в результате разложения.

В то же время, общее первоначальное число молекул целлюлозы

$$M = x + y. \quad (2)$$

и может быть рассчитано по молекулярной массе

$$M = 10^6 G_б / (162\ СП_0), \quad (3)$$

где $G_б$ – масса бумаги, т; 162 – молекулярная масса ангидроглюкозидного звена.

Подставляя $x = M - y$ в уравнение (1), получаем:

$$СП = M \cdot СП_0 / (M + y), \quad (4)$$

откуда

$$y = M\ (СП_0 - СП) / СП. \quad (5)$$

После подстановки уравнения (3)

$$y = 10^6\ (G_б / 162)(1/СП - 1/СП_о). \quad (6)$$

Значение y – число целлюлозных цепей, подвергшихся деградации в какой-то момент времени с образованием молекул левоглюкозана. Отсюда, соответственно, количество разложившейся бумаги (в граммах)

$$m_{-б} = 10^6\ G_б\ (1/СП - 1/СП_0) \quad (7)$$

где $G_б$ – масса бумаги, т.

В соответствии с этим уравнением масса разложенной бумаги при изменении степени полимеризации от 1000 до 250 составит 3 мг на грамм, или наоборот, сравнительно небольшая потеря массы целлюлозы связана с резким падением степени полимеризации. Главная особенность этого механизма – независимость от места разрыва молекулы целлюлозы при условии, что все образованные фрагменты остаются в массе целлюлозы. Объектом этого механизма разложения целлюлозы может быть практически вся масса бумаги.

Концепция отрыва крайнего звена в среде изоляционного масла

В отличие от обрыва внутри цепи, приводящего к резкому снижению степени полимеризации, обрыв крайнего звена или нескольких звеньев с последующим их полным разложением до газов и воды не повлечёт за собой заметного изменения степени полимеризации. Такой акт может происходить с цепями целлюлозы, свободные концы которых плавают в недружественной среде минерального масла. Крайние цепи пропитанной маслом аморфной целлюлозы и, в меньшей степени, отрывающиеся под действием атакующих молекул масла крайние цепи кристаллической целлюлозы являются объектами этого механизма. Плавая в масле, они в меньшей степени защищены силами адсорбции и после обрыва не остаются в сфере воздействия молекулярных сил целлюлозы, не составляют массу целлюлозы и не вносят свой вклад в формирование измеряемого значения степени полимеризации. Оторвавшиеся концевые звенья, окружённые молекулами углеводородов масла, остаются в минеральном масле до полного разложения под действием свободных радикалов.

Вероятно, этот механизм действует постоянно, но основной его вклад вносится в начальный период эксплуатации оборудования, в начальный период старения бумажной изоляции. Принципиальная особенность этого механизма в том, что образование продуктов разложения целлюлозы связано со снижением степени полимеризации иным законом.

При отрыве крайних звеньев степень полимеризации данной молекулы уменьшится на число оторвавшихся звеньев. При этом средняя степень полимеризации бумаги

$$СП = \frac{x СП_0 + y(СП_0 - n)}{x + y}, \quad (8)$$

где x – число молекул, не подвергшихся разложению; y – число молекул, подвергшихся разложению; n – число оторвавшихся единичных концевых звеньев.

Общее число молекул целлюлозы

$$M = x + y.$$

После подстановки уравнения (2) в (8) получаем:

$$yn = M\ (СП_0 - СП). \quad (9)$$

Произведение yn – это число молей левоглюкозана, которые образовались в результате данного процесса. Если его помножить на молекулярную массу левоглюкозана, то будет получена масса левоглюкозана, т.е. количество потерянной бумаги $m_{-б}$, которая в дальнейшем будет превращена в газы и воду. После подстановки M (из уравнения (3))

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$m_{-б} = 162\ уп = 10^6 G_б\ (СП_0 - СП)\ /\ СП_0. \quad (10)$$

Это уравнение показывает взаимосвязь образующейся массы левоглюкозана с изменением степени полимеризации при отрыве концевого звена при условии, что процесс протекает только по этому механизму. Из него следует, что если бы процесс разложения бумаги шел только по этому направлению, то при достижении $СП = 250$ (от $СП = 1000$) три четверти массы целлюлозы было бы разложено, или наоборот, сравнительно большая потеря массы связана с незначительным изменением степени полимеризации. Но объектом этого механизма может быть только очень небольшая часть массы целлюлозы, составляющей крайние цепи аморфной целлюлозы, т.е. главным образом, бахрома.

Кинетика разложения целлюлозы

Скорость химической реакции разложения кристаллической целлюлозы с образованием фурановых соединений постоянна и зависит, главным образом, от температуры, влажности и прочих внешних факторов, но не от концентрации исходного компонента, так как запас бумаги для этой реакции неограничен и только незначительная её часть тратится на разложение. По этой причине порядок реакции может быть снижен, и эта реакция может быть отнесена к мономолекулярным реакциям нулевого порядка:

$$dc\ /dt = k, \quad (11)$$

где k – константа скорости разложения целлюлозы; c – концентрация целлюлозы, которую можно представить числом молей в системе (через массу бумаги $G_б$)

$$c = G_б\ /(162\ СП)^*$$

Тогда уравнение (11) будет иметь вид

$$d(1/СП)/dt = k_{с.п}.$$

где $k_{с.п}$ – константа скорости изменения степени полимеризации.

После интегрирования

$$1/СП - 1/СП_0 = k_{с.п} t. \quad (12)$$

К такому же уравнению пришел Эмсли [3, 4] эмпирическим путём. Он продемонстрировал, что это уравнение может быть приложено к данным Фабре и Пичона [5]. Мы получили это уравнение теоретическим путём после принятия концепции о нулевом порядке реакции. Последующую интерпретацию Эмсли для предэкспоненциального члена в температурной зависимости константы скорости мы нашли продуктивной и усовершенствовали следующим образом: представленные Эмсли [3] значения предэкспоненциального множителя для крафт- и хлопковой бумаги в зависимости от влажности выразили в аналитической форме и записали как функцию основы, влажности бумаги, концентрации кислорода, количества антиоксиданта или кислотности масла. Тем самым было учтено 2,5-кратное увеличение выхода фурановых (а значит разложения бумаги) в воздушной атмосфере по сравнению с дегазированным состоянием [2, 6], независимость от концентрации кислорода при высокой влажности [7], ускорение вдвое старения старых неингибированных масел по сравнению с новыми неингибированными, в 2,7 раза новых неингибированных по сравнению с новыми ингибированными и в 1,3 раза старых ингибированных по сравнению с новыми ингибированными [8]. Выразив степень старения ингибированного масла через концентрацию антиоксиданта $c_{ант}$ (%) и степень старения неингибированного масла – через кислотное число КЧ (мг КОН на 1 г масла) соответствующим коэффициентом:

– для ингибированного масла

$$\Psi = 0{,}5 - 0{,}11 \frac{(c_{ант} - c_{ант\,min})}{(c_{ант.нор} - c_{ант\,min})}; \quad (13)$$

– для неингибированного масла

$$\Psi = 1 + \frac{КЧ_{ант} - КЧ_{нор}}{КЧ_{доп} - КЧ_{нор}}, \quad (13')$$

где $КЧ_{доп}$, $c_{ант\ min}$ и $КЧ_{нор}$, $c_{ант.нор}$ – допустимое для старого и нормативное для нового значения кислотного числа изоляционного масла и концентрации антиоксиданта, получили уравнение для расчёта константы скорости изменения степени полимеризации

$$k_{с.п} = \psi e^{0{,}5(3W_m - W)\varphi_{O_2}} k_b \cdot 10^{8+0{,}38W} e^{-Q/(RT)}, \quad (14)$$

* Формально, мольная концентрация бумаги увеличивается по мере снижения степени полимеризации (поэтому в (11) отсутствует знак минуса).

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где φ_{O_2} – относительное содержание кислорода (0,21 в воздухе); W – влажность бумаги, %, в пределах трёх молекулярных адсорбционных слоёв[2] (т.е. для $W \leq 3W_m$), k_b – определяется основой бумаги: для крафт – 1, для хлопковой – 0,3, Q – энергия активации, кДж/моль; T – абсолютная температура.

Влажность мономолекулярного слоя может быть рассчитана по уравнению и данным, приведённым в таблице.

Таким образом, изменение степени полимеризации может быть рассчитано по времени и параметрам опыта старения (или режима эксплуатации, если считать его постоянным) в соответствии с уравнениями (12)–(14). В соответствии с уравнениями (7) и (12) количество разложенной целлюлозы в массе кристаллита

$$m_{-б} = 10^6\, G_б\, (1/СП - 1/СП_0) = 10^6\, G_б\, k_{с.п} t. \quad (15)$$

Особенность процесса, протекающего по механизму отрыва крайнего звена в сфере воздействия минерального масла, в том, что он охватывает только ограниченную часть бумаги, в основном, бахрому. В связи с этим, дифференциальное уравнение, описывающее изменение количества реагента в системе,

$$dm_б / dt = -k_б\, m_б,$$

и масса разложенной целлюлозы

$$m_{-б} = m_{б.о}\, [1 - \exp(-k_б t)], \quad (16)$$

Исходные данные, уравнение и коэффициенты для расчета влажности монослоя для трёх типов бумаги [9]

Температура, °С	Влажность монослоя, W_m, %		
	Кабельная бумага К-120	Картон ЭМЦ	Конденсаторная бумага КОН-2
23	4,38	4,6	
26			4,22
29	4,25	4,44	4,08
45	3,86	3,92	
70	3,44	3,30	3,25
W_m =	–2,7547+ +2114,7/T	–5,1544+ +2893,8/T	–3,1154+ +2184,3/T

[2] Четвёртый слой адсорбата испытывает незначительное влияние адсорбента, и парциальное давление адсорбата приближается к давлению насыщения. Этот подход соответствует [10] где показано, что скорость разложения бумаги пропорциональна её содержанию при влажности до 7 %.

где $m_{б.о}$ – общее количество целлюлозы, находящейся в сфере воздействия минерального масла, которое к концу этого процесса будет разложено; $k_б$ – константа скорости разложения целлюлозы по этому механизму; t – время.

Процесс по этому механизму протекает значительно быстрее. В то время, как завершение процесса в кристаллической целлюлозе (процесс II) происходит к моменту времени t, для завершения процесса в аморфной целлюлозе (процесс I) требуется намного меньший промежуток времени. При этом полное разложение бумаги по процессу II приведёт, в конечном счёте, к $СП = 1$, а завершение процесса I, в связи с ограниченностью материала, лишь незначительно изменит степень полимеризации ($СП \approx СП_0$).

Если в механизме разложения целлюлозы до фурановых соединений (уравнения (7) и (15) произведение константы скорости на время выражалось через $1/СП - 1/СП_0$, равное $k_{с.п} t$ (12), то в данном механизме, при обрыве крайнего звена в сфере воздействия минерального масла, эту функцию выполняет $(СП_0 - СП)/СП_0$ (уравнение (10)), равное $k_б t$,

$$k_б\, t = (СП_0 - СП)/СП_0 = 1 - СП/СП_0 =$$
$$= СП(1/СП - 1/СП_0) = СП\, k'_{с.п}\, t = СП\, k_\tau\, k_{сп}\, t,$$

где $k'_{с.п}$ – константа скорости изменения степени полимеризации, эквивалентная константе скорости разложения кристаллического материала; k_τ – постоянная, согласующая скорости в двух процессах.

Поскольку из (12) $СП = 1/(k_{с.п}\, t + 1/СП_0)$, то окончательно получаем

$$k_б\, t = k_\tau / (1/(СП_0\, k_{с.п}\, t) + 1), \quad (17)$$

и кинетическое уравнение (16) для механизма отрыва крайнего звена в масле

$$m_{-б} = m_{б.о}\, [1 - \exp(-k_\tau / (1/(СП_0\, k_{с.п}\, t) + 1))]. \quad (18)$$

Количество целлюлозы $m_{б.о}$, которое подвергнется разложению, выразим через ее долю K^* от общей массы

$$m_{б.о} = K^* 10_6 G_б \quad (19)$$

где $G_б$ – общая масса бумаги, т.

Кинетическое уравнение разложения бумаги по первому механизму

$$m_{-б} = K^* 10_6 G_б\, [1 - \exp(-k_\tau / (1/(СП_0\, k_{с.п} t) + 1))]. \quad (20)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Итак, два независимых процесса разложения бумаги, протекающих с разной скоростью, можно выразить через одну константу скорости изменения степени полимеризации и единое время:

– процесс I (в сфере действия минерального масла) – уравнение (20);

– процесс II (в кристаллитной части целлюлозы) – уравнение (15),

причём направление химического процесса разложения целлюлозы определяется не наличием так называемых слабых связей, а окружающей средой.

С учётом того, что в процессе эксплуатации в маслонаполненном электрооборудовании происходит значительное увеличение влагосодержания, а влагосодержание бумаги сильно влияет на скорость её термического разложения, становится ясно, что рассматривать константу скорости разложения бумаги как постоянную неправомерно. В соответствии с уравнением (14) увеличение влажности должно приводить к росту константы скорости. Однако, Эмсли [7, 11] пришёл к выводу, что процесс разложения постепенно приостанавливается, и для учёта этого явления ввёл поправку

$$d(1/DP) / dt = k_1 \exp(-k_2 t), \qquad (21)$$

которая хорошо описала замедление процесса разложения на конечной стадии, при достижении небольших значений степени полимеризации

$$1/DP - 1/DP_o = k_1/k_2 (1 - e^{-k_2 t}). \qquad (22)$$

Из всего этого можно сделать вывод, что существует какое-то физическое явление, которое компенсирует ускоряющее действие увлажнения.

Очевидно, что не время, т.е. продолжительность процесса деградации, является причиной снижения константы скорости, как это следует из уравнения (21), а сам факт снижения степени полимеризации. И если представить константу скорости линейной функцией от обратного значения степени полимеризации

$$d(1/СП) / dt = k_1 - k_2/СП, \qquad (23)$$

то решение окажется полностью эквивалентным уравнению (22), полученному Эмсли,

$$1/СП - 1/СП_0 = (1/СП_{min} - 1/СП_0)(1 - e^{-k_2 t}) \qquad (24)$$

(поскольку отношение k_1/k_2 в уравнении (22) при $t \to \infty$ превращается в $(1/СП_{min} - 1/СП_0)$, где $СП_{min}$ – предел, к которому приблизится степень полимеризации при данной температуре).

И уравнение (22), и уравнение (24) представляют процесс термического разложения целлюлозы таким образом, что при бесконечно большом времени и заданной температуре разложение достигнет определенной степени полимеризации и остановится. Эта концепция маловероятна. Процесс может сильно затормозиться, но не остановится, и будет продолжаться до полного уничтожения целлюлозного материала.

Истинной причиной снижения константы скорости разложения целлюлозы является увеличение энергии активации разрыва гликозидной связи по мере снижения степени полимеризации. Структура целлюлозы в искусственно приготовленном изделии – бумаге – неоднородна. Эта неоднородность проявляется и на молекулярном энергетическом уровне. Повышение температуры приводит к механическому напряжению молекул за счёт термического расширения, в основе которого лежит увеличение амплитуды колебаний атомов. Следствием этого является снижение прочности связей, выполняющих роль связующих кристаллита, и напряжения внутри кристаллитного материала – стерических, пространственных факторов, что приводит к снижению энергии активации – барьера, который необходимо преодолеть для завершения химической реакции. Но по мере разрыва напряженных связей энергия активации возрастает до значения, характерного для стерически ненапряжённой структуры. В меньшей степени такое явление характерно для мелких молекул – для низкой степени полимеризации и, естественно, полностью отсутствует у тримеров и димеров, для которых энергия активации разрыва гликозидной связи максимальна. Но пока громоздкие молекулы образуют структурно неоднородный конгломерат, их термическое разложение будет начинаться при несколько сниженной энергии активации.

Уравнение (14) позволяет проанализировать влияние влажности и энергии активации на значение константы скорости и увидеть,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

что увеличение влажности от 0,2 до 2% в 4–5 раз ускоряет процесс, а рост энергии активации от 110 до 115 кДж/моль затормаживает процесс в 4–6 раз. В целом, в выбранных границах эти воздействия будут себя компенсировать, и суммарное воздействие этих факторов приведёт к затормаживанию процесса разложения в том случае, если будет ограничен окислительный процесс, поставляющий в оборудование наибольшее количество воды.

Бумага является главным поставщиком воды. Расчёт количества образующейся из бумаги воды будет представлен во второй части этой статьи. Здесь мы ограничимся общим видом этого процесса: монотонным и линейным увеличением воды с течением времени. И поскольку практически вся влага располагается в бумаге, то запишем влагосодержание бумаги в виде линейной функции от времени

$$W = N + L\,t, \qquad (25)$$

где N и L – постоянные, определяемые условиями эксперимента или условиями эксплуатации оборудования, это могут быть данные периодического анализа или мониторинга, или расчётные данные, как будет показано во второй части статьи.

Наиболее подходящая форма уравнения зависимости энергии активации от степени полимеризации

$$Q = Q_{\max} - \Delta Q\, e^{-СП_0/СП} \qquad (26)$$

(ориентировочные значения $Q_{\max}$ = 111,5 кДж/моль, ΔQ = 15 кДж/моль, $СП_0$ = 1250).

В таком виде уравнение имеет нижний и верхний пределы. Когда степень полимеризации высокая, энергия активации минимальна ($Q_{\max} - \Delta Q$) – работает стерический фактор. Когда степень полимеризации снижается за счёт разрушения напряжённых молекул, энергия активации возрастает до уровня, характерного для более компактных молекул, которые в меньшей степени испытывают пространственные напряжения – в пределе до $Q_{\max}$ для димера.

С учётом уравнений (25) и (26) константу скорости (уравнение (14)) представляем как функцию влажности и энергии активации и выражаем через степень полимеризации и время

$$k_{с.п} = \Psi e^{0,5(3W_м - N - Lt)\varphi_{O_2}} k_{осн} \cdot 10^{8 + 0,38(N+Lt)} \times$$
$$\times\, e^{-(Q_{\max} - \Delta Q \exp(-СП_0/СП)/(RT))}. \qquad (27)$$

Уравнение (27) приводим к более общему виду

$$k_{с.п} = A\, e^{Bt}\, e^{\Delta Q \exp(-СП0/СП)/(RT)}, \qquad (28)$$

где $A = \Psi e^{0,5(3W_м - N)\varphi_{O_2}} k_{осн} \cdot 10^{8 + 0,38(N+Lt)} \times$ $\times\, e^{-(Q_{\max}/(RT)}$ $B = (0,875 - 0,5\varphi_{O_2})L$, Ψ – по уравнениям (13); $W_м$ – по уравнениям в таблице; $k_{осн}$ – определяется основой бумаги: для крафт 1, для хлопковой 0,3.

Кинетическое уравнение в дифференциальной форме запишется как

$$d(1/СП)/\,dt = k_{с.п} = A\, e^{Bt} e^{\Delta Q \exp(-СП_0/СП)/(RT)}.$$

Решение этого уравнения

$$1/СП - 1/СП_0 + d(z-1)/h - d^2(z^2-1)/(2h\cdot 2!) +$$
$$+ d^3(z^3-1)/(3h\cdot 3!) - d^4(z^4-1)/(4h\cdot 4!) + \ldots =$$
$$= (A/B)(e^{Bt} - 1), \text{ для } W \le 3W_м, \qquad (29)$$

где $d = e^{-1}\Delta Q\,/(RT)$, $z = e^{-СП_0\,(1/СП - 1/СП_0)}$, $h = СП_0$, остальное как в уравнении (28).

Уравнение (29) определяет изменение степени полимеризации бумаги до момента начала образования четвёртого адсорбционного молекулярного поверхностного слоя воды. Время достижения влажности этого состояния (в часах) определяется из уравнения (25):

$$t_{\max} = (3W_м - N)\,/\,L.$$

Дальнейшее увеличение влажности не оказывает влияния на процесс деструкции бумаги, поскольку парциальное давление воды при этом приближается к давлению насыщения. Уравнение константы скорости изменения степени полимеризации (27) для этой ситуации запишется как:

$$k_{с.п} = \Psi e^{0,5(3W_м - 3W_м)\varphi_{O_2}} k_{осн} \cdot 10^{8 + 0,38\cdot 3W_м} \times$$
$$\times e^{-Q_{\max}/(RT)}\, e^{\Delta Q \exp(-СП_0/СП)/(RT)} =$$
$$= \Psi\, k_{осн} \cdot 10^{8+1,14W_м} e^{-Q_{\max}/(RT)}\, e^{\Delta Q \exp(-СП_0/СП)/(RT)}$$

или

$$k_{с.п} = A\, e^{\Delta Q \exp(-СП_0/СП)/(RT)},$$

где $A = \Psi k_{осн} \cdot 10^{8 + 1,14W_м}\, e^{-Q_{\max}/(RT)}$.

Кинетическое уравнение в дифференциальной форме

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$d(1/СП)/dt = k_{с.п} = A\ e^{\Delta Q \exp(-СП_0/СП)/(RT)}$$

и окончательно

$$1/СП - 1/СП_0 + d(z-1)/h - d^2(z^2-1)/(4h) +$$

$$+d^3(z^3-1)/(18h) - d^4(z^4-1)/(96h) + \ldots =$$

$$= At \text{ для } W > 3W_м, \qquad (30)$$

где $A = \Psi k_{осн}\ 10^{8+1,14W_м}\ e^{-Q_{max}/(RT)}$ для $t \geq (3W_м - N)/L$ или $W_0 \geq 3W_м$, остальные обозначения – как для уравнения (29).

Практическое использование уравнений (29) и (30) вызывает определённые трудности. При выборе недостаточного числа членов ряда ошибка определения начального участка резкого снижения степени полимеризации возрастает. В ряде случаев необходимо оперировать десятью членами ряда. Тем не менее, это наиболее точное представление зависимости изменения степени полимеризации целлюлозы под действием тепла, учитывающее влияние температуры, изменяющихся влажности, энергии активации, концентрации кислорода (с позиции увеличения константы скорости), влияние основы целлюлозного материала и т.д.

Кинетическое уравнение для степени полимеризации бумаги

Опираясь на расчёт количества разложенной бумаги по первому и второму механизмам, мы определили, что влияние механизма отрыва крайнего звена на изменение степени полимеризации ничтожно и степень полимеризации определяется исключительно механизмом разрыва среднего звена в кристаллитной массе целлюлозы, которое описывается уравнением (15). С учётом уравнения для определения константы скорости по этому механизму (14) записываем общее кинетическое уравнение для расчёта степени полимеризации:

$$1/СП = \Psi e^{0,5(3W_м - W)\varphi_{O_2}} k_{осн} \cdot 10^{8+0,38W} e^{-Q/(RT)} + 1/СП_0, \quad (31)$$

где $W \leq 3W_м$, при $W > 3W_м$ в расчёт берётся $W = 3W_м$; $W_м$ – по уравнениям в таблице; Ψ – по уравнениям (13), $k_{осн}$=1 для крафт-бумаги, $k_{осн}$ = 0,3 для хлопковой; $Q \approx 111$ кДж/моль.

Эмсли [11] показал, что реальные отклонения от линейности зависимости степени полимеризации от времени в форме уравнения (12) начинаются при степени полимеризации ниже 250. Поскольку это значение рассматривается как предельно допустимое, то для всех практических и теоретических расчётов можно оставаться на позиции линейного уравнения (31) и использовать его для расчёта общего количества образующихся компонентов и их концентрации в масле и, наоборот, по результатам измерения продуктов разложения постепенно осваивать возможность определения ресурса твёрдой изоляции в работающем электротехническом оборудовании.

Выводы

1. Основой формирования концепций развала и последующего химического превращения молекулы целлюлозы явилось существование двух форм целлюлозы (кристаллической и аморфной) и их взаимодействие с окружающей средой (изоляционным маслом). В дополнение к концепции разрыва среднего звена предложена концепция отрыва крайнего звена молекулы целлюлозы. Эти две концепции определяют два направления старения целлюлозной изоляции, разных как в химическом отношении, так и по скорости.

2. С учётом особенностей химического превращения целлюлозного материала дано объяснение замедлению процесса старения со временем, несмотря на увеличивающееся увлажнение. Причиной этого является стерический фактор: более мелкие молекулы целлюлозы требуют большей энергии активации разрыва гликозидной связи.

3. Предложено кинетическое уравнение степени полимеризации целлюлозы для всех практических целей, учитывающее многие технические факторы работающего электрооборудования или эксперимента.

Во второй части статьи будут представлены кинетические уравнения для расчёта количества фурфурола, газов и воды с учётом влияния концентрации кислорода на направление химических реакций, предварительной термической обработки, распределения образовавшихся продуктов между газовой фазой, маслом и бумагой, а также оценка возможности использования получаемых сведений для формирования диагностического заключения.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Список литературы

1. **Carballeira M.** HPLC contribution survey during service or heat tests // Electra. 1990. № 133. P.45–51.
2. **De Pablo A., Pahlavanpour B.** Furanic compounds analysis: a tool for predictive maintenance of oil-filled electrical equipment // Electra. 1997. № 175. P. 9–32.
3. **Emsley A.M., Stevens G.C.** A reassessment of the low temperature thermal degradation of cellulose // 16th Int. Conf. Dielectric Materials. Materials. Manchester: Measurements and Applications Sept. 7–10, 1992.
4. **Emsley A.M.** The kinetics and mechanisms of degradation of cellulosic insulation in power transformers. Polym. Deg. Stab. 1994. 44. P. 343.
5. **Fabre J., Pichon A.** Deterioration processes and products of paper in oil. CIGRE Paper 137, 1960.
6. **Serena E.** Update on experience with furfural analysis. CIGRE WG 15.01 meeting, 1991.
7. **Emsley A.M., Xiao X, Heywood R. J. and Ali M.** Degradation of cellulosic insulation in power transformers: 3. The Effects of Oxygen and Water on Ageing in Oil // IEE Proc. Sci. Meas. Technol. 2000. Vol. 147, № 3. P. 115–119.
8. **Mulej M., Varl A., Koncan-Gradnik M.** Up-to-date experience on furans for transformer diagnostics. XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering. Netherlands, 2003.
9. **Куц П.С., Пикус И.Ф.** Теплофизические и технологические основы сушки высоковольтной изоляции. Минск: Наука и техника, 1979.
10. **Moser H.P., Dahinden V., Schneider E. a.o.** New result on ageing of aramid and cellulose pressboard under selective conditions. CIGRE Symp. 05-87, 1987.
11. **Emsley A.M., Heywood R.J., Ali M. and Eley C.M.** On the kinetics of degradation of cellulose // Cellulose. 1997. Vol. 4. P.1–5.

Исследование зависимости ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с плёночным диэлектриком от режимов эксплуатации

ГРЕБЕННИКОВ И.Ю., ГУНЬКО В.И., ДМИТРИШИН А.Я., МИХАЙЛОВ И.Г, ОНИЩЕНКО Л.И., ФЕЩУК Т.А.

Рассмотрено влияние режимов эксплуатации на ожидаемый ресурс высоковольтного импульсного конденсатора с плёночным диэлектриком и приведены эмпирические зависимости среднего ресурса конденсатора от режима и эксплуатации для различных плёночных диэлектрических систем.

Are reviewed influencing modes of exploitation on anticipated safe life of the high-voltage pulse capacitor with film dielectric and the empirical-formula dependences of mean safe life of the capacitor from a mode of exploitation for different film dielectric systems are adduced.

Возрастающий уровень высоковольтной импульсной техники требует создания новых типов высоковольтных импульсных конденсаторов с повышенными значениями удельной запасаемой энергии и ресурса. Такие конденсаторы необходимы для многих областей науки и техники, где особенно остро стоят вопросы снижения массогабаритных показателей, повышения удельных энергетических характеристик, надёжности и срока службы оборудования электрофизических установок.

В настоящее время в ИИПТ НАН Украины проводятся исследования по созданию высоковольтных импульсных конденсаторов с повышенной удельной запасаемой энергией и ресурсом при применении в качестве рабочего диэлектрика секций конденсаторов полимерных плёнок, пропитанных неполярной диэлектрической жидкостью с низкой вязкостью, высокой газостойкостью и низким тангенсом угла потерь.

Необходимо отметить, что на ресурс конденсатора кроме значения рабочей напряжённости электрического поля в диэлектрике, которое в основном и определяет значение удельной запасаемой энергии конденсатора, существенное влияние оказывает и режим эксплуатации конденсатора – декремент колебания разрядного напряжения, частота сле-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

дования зарядов-разрядов, частота тока в разрядном контуре, температура окружающей среды. Зависимость ресурса конденсатора от режима эксплуатации может быть выражена эмпирической формулой [1, 2]:

$$N = AE_{\text{р}}^{-m} f^{b} F^{-l} \Delta^{n/2} 10^{\beta T}, \qquad (1)$$

где N – ресурс конденсатора, зарядов-разрядов; $E_{\text{р}}$ – рабочая напряжённость электрического поля в диэлектрике, кВ/мм; f – частота следования зарядов-разрядов, Гц; F – частота тока в разрядном контуре, Гц; Δ – декремент колебаний разрядного напряжения; T – температура в центре конденсатора, К; A, m, b, l, n, β – экспериментально полученные коэффициенты, зависящие от режима работы конденсатора и технологии его изготовления.

Для конденсаторов с бумажно-масляным диэлектриком согласно [2] $A = 2{,}72 \cdot 10^{21}$, $m = 8 \div 10$, $b = 0{,}21$, $l = 0{,}237$, $n = 2{,}33$ и $\beta = 2{,}73 \cdot 10^{-3}$.

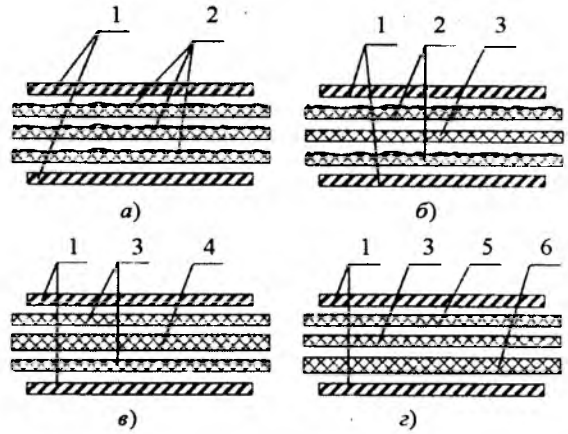
Исследования, проведённые в ИИПТ НАН Украины показали, что для конденсаторов с бумажно-плёночным диэлектриком можно использовать опытные коэффициенты, полученные для бумажно-масляной изоляции, при этом коэффициент $m = 6$. А для конденсаторов с чисто плёночным диэлектриком эти коэффициенты были определены экспериментально.

Исследования проводились на макетах плоскопрессованных секций со скрытой фольгой и следующими диэлектрическими системами:

1) с полипропиленовым диэлектриком толщиной 36 мкм, состоящим из трёх слоёв односторонне шероховатой полипропиленовой плёнки ПП-КСШ толщиной 12 мкм (рисунок, *а*), пропитанным фенилксилилэтаном;

2) с комбинированным полипропиленово-полиэтилентерефталатным диэлектриком толщиной 34 мкм, состоящим из чередующихся двух слоёв односторонне шероховатой полипропиленовой плёнки ПП-КСШ толщиной 12 мкм и одного слоя полиэтилентерефталатной плёнки ПЭТ-КЭ толщиной 10 мкм (рисунок, *б*), с пропиткой жидкостями – ФКЭ, трансформаторным маслом Т-1500 и полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-10;

3) с полиэтилентерефталатным диэлектриком толщиной 35 мкм, состоящим из трёх слоёв гладкой полиэтилентерефталатной плёнки ПЭТ-КЭ, из них два слоя толщиной 10 мкм и один слой толщиной 15 мкм (рисунок, *в*), с пропиткой жидкостями – трансформаторным маслом Т-1500 и полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-10;



Конструкция диэлектрических систем плоскопрессованных макетов секций:
1– обкладка из алюминиевой фольги ДПРНТ 0,009×100; *2* – диэлектрик из односторонне шероховатой полипропиленовой плёнки ПП-КСШ 12×120; *3* – диэлектрик из полиэтилентерефталатной плёнки ПЭТ-КЭ 10×120; *4* – диэлектрик из полиэтилентерефталатной плёнки ПЭТ-КЭ 15×120; *5* – диэлектрик из поликарбонатной плёнки ПК-К 10×120; 6 – диэлектрик из поликарбонатной плёнки ПК-К 15×120;

4) с комбинированным поликарбонатно-полиэтилентерефталатным диэлектриком толщиной 35 мкм, состоящим из двух слоёв гладкой поликарбонатной плёнки ПК-К толщиной 10 и 15 мкм и одного слоя гладкой плёнки ПЭТ-КЭ толщиной 10 мкм (рисунок, *г*), с пропиткой жидкостями фенилксилилэтаном, трансформаторным маслом Т-1500 и полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-10.

Данные ресурсных испытаний макетов секций с различными диэлектрическими системами приведены в таблице.

Проведённые исследования позволили получить эмпирические зависимости среднего ресурса конденсатора от режима эксплуатации для следующих плёночных диэлектрических систем:

– для полипропиленового диэлектрика, пропитанного фенилксилилэтаном

$$N = 1{,}452 \cdot 10^{22} E_{\text{р}}^{-7{,}125} f^{0{,}079} F^{-0{,}391} \Delta^{0{,}0715} \times$$
$$\times 10^{3{,}897 \cdot 10^{-3} \cdot T}.$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Данные ресурсных испытаний макетов секций с различными диэлектрическими системами

Тип диэлектрика и его конструкция	Пропитывающий диэлектрик	$E_р$, кВ/мм	Режим испытаний			Средняя наработка макетов секций, зарядов-разрядов
			Δ	f, Гц	F, Гц	
Полипропиленовый ПП-КСШ 3 × 12	ФКЭ	173,6	25	2	$20 \cdot 10^3$	$6{,}32 \cdot 10^5$
			11	2	$26{,}7 \cdot 10^3$	$5{,}97 \cdot 10^5$
			25	4	$20 \cdot 10^3$	$6{,}68 \cdot 10^5$
Комбинированный полипропиленово-полиэтилентерефталатный ПП-КСШ 2 × 12 + ПЭТ-КЭ 1 × 10	ФКЭ	183,8	25	2	$20 \cdot 10^3$	$6{,}47 \cdot 10^5$
			11	2	$26{,}7 \cdot 10^3$	$6{,}28 \cdot 10^5$
			25	4	$20 \cdot 10^3$	$6{,}84 \cdot 10^5$
	Трансформаторное масло Т- 1500	183,8	25	2	$20 \cdot 10^3$	$5{,}58 \cdot 10^5$
			11	2	$26{,}7 \cdot 10^3$	$5{,}30 \cdot 10^5$
			25	4	$20 \cdot 10^3$	$5{,}90 \cdot 10^5$
	ПМС-10	183,8	25	2	$20 \cdot 10^3$	$4{,}62 \cdot 10^5$
			11	2	$26{,}7 \cdot 10^3$	$4{,}38 \cdot 10^3$
			25	4	$20 \cdot 10^3$	$4{,}99 \cdot 10^5$
Полиэтилентерефталатный ПЭТ-КЭ 2 × 10 + 1 × 15	Трансформаторное масло Т- 1500	178,6	25	2	$20 \cdot 10^3$	$5{,}26 \cdot 10^5$
			11	2	$26{,}7 \cdot 10^3$	$4{,}83 \cdot 10^5$
			25	4	$20 \cdot 10^3$	$5{,}65 \cdot 10^5$
	ПМС-10	178,6	25	2	$20 \cdot 10^3$	$4{,}22 \cdot 10^5$
			11	2	$26{,}7 \cdot 10^3$	$4{,}19 \cdot 10^5$
			25	4	$20 \cdot 10^3$	$4{,}54 \cdot 10^5$
Комбинированный поликарбонатно-полиэтилентерефталатный ПК-К 1 × 10 + 1 × 15 + ПЭТ-КЭ 1 × 10	ФКЭ	178,6	25	2	$20 \cdot 10^3$	$5{,}24 \cdot 10^5$
			11	2	$26{,}7 \cdot 10^3$	$4{,}98 \cdot 10^5$
			25	4	$20 \cdot 10^3$	$5{,}53 \cdot 10^5$
	Трансформаторное масло Т- 1500	178,6	25	2	$20 \cdot 10^3$	$4{,}89 \cdot 10^5$
			11	2	$26{,}7 \cdot 10^3$	$4{,}69 \cdot 10^5$
			25	4	$20 \cdot 10^3$	$5{,}21 \cdot 10^5$
	ПМС-10	178,6	25	2	$20 \cdot 10^3$	$4{,}90 \cdot 10^5$
			11	2	$26{,}7 \cdot 10^3$	$4{,}53 \cdot 10^5$
			25	4	$20 \cdot 10^3$	$5{,}21 \cdot 10^5$

– для комбинированного полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектрика, пропитанного:

1) фенилксилилэтаном

$$N = 9{,}347 \cdot 10^{21} E_р^{-7{,}025} f^{0{,}082} F^{-0{,}299} \Delta^{0{,}037} \times$$
$$\times 10^{3{,}21 \cdot 10^{-3} \cdot T};$$

2) трансформаторным маслом Т-1500

$$N = 1{,}187 \cdot 10^{22} E_р^{-7{,}061} f^{0{,}055} F^{-0{,}313} \Delta^{0{,}064} \times$$
$$\times 10^{3{,}018 \cdot 10^{-3} \cdot T};$$

3) полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-10

$$N = 7{,}951 \cdot 10^{22} E_р^{-7{,}263} f^{0{,}110} F^{-0{,}447} \Delta^{0{,}159} \times$$
$$\times 10^{2{,}925 \cdot 10^{-3} \cdot T};$$

– для полиэтилентерефталатного диэлектрика, пропитанного:

1) трансформаторным маслом Т-1 500

$$N = 6{,}029 \cdot 10^{22} E_р^{-7{,}107} f^{0{,}077} F^{-0{,}482} \Delta^{0{,}105} \times$$
$$\times 10^{2{,}61 \cdot 10^{-3} \cdot T};$$

2) полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-10

$$N = 6{,}265 \cdot 10^{22} E_р^{-7{,}577} f^{0{,}108} F^{-0{,}281} \Delta^{0{,}086} \times$$
$$\times 10^{3{,}154 \cdot 10^{-3} \cdot T};$$

– для комбинированного поликарбонатно-полиэтилентерефталатного диэлектрика, пропитанного:

1) фенилксилилэтаном

$$N = 2{,}234 \cdot 10^{22} E_р^{-7{,}088} f^{0{,}076} F^{-0{,}363} \Delta^{0{,}0645} \times$$
$$\times 10^{2{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot T};$$

2) трансформаторным маслом Т-1500

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$N = 1{,}116 \cdot 10^{22} E_{\text{р}}^{-7{,}102} f^{0{,}061} F^{-0{,}298} \Delta^{0{,}054} \times$$
$$\times 10^{2{,}753 \cdot 10^{-3} \cdot T};$$

3) полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-10

$$N = 1{,}752 \cdot 10^{23} E_{\text{р}}^{-7{,}358} f^{0{,}090} F^{-0{,}488} \Delta^{0{,}1735} \times$$
$$\times 10^{2{,}817 \cdot 10^{-3} \cdot T}.$$

Таким образом, приведённые эмпирические формулы позволяют определить подходы для создания высоковольтных импульсных конденсаторов с плёночным диэлектриком в зависимости от ресурса и режимов эксплуатации.

Список литературы:

1. **Маршак И.С., Дойников А.С., Кирсанов В.П. и др.** Импульсные источники света. М.: Энергия, 1978.

2. **Конотоп В.В.** Основы проектирования высоковольтных импульсных устройств. Харьков: ХПИ, 1973.

Гребенников Игорь Юрьевич – ведущий инженер-конструктор Института импульсных процессов и технологий (ИИПП) НАН Украины. Окончил факультет "Электрооборудование судов" Николаевского кораблестроительного института в 1984 г.

Гунько Виктор Иванович – ведущий инженер-технолог ИИПП НАН Украины. Окончил факультет "Общетехническая дисциплина и физика" Бельцкого государственного педагогического института в 1982 г.

Дмитришин Алексей Ярославович – младший научный сотрудник ИИПП НАН Украины. Окончил электротехнический факультет Украинского государственного морского технического университета в 2002 г.

Онищенко Лидия Ивановна – заведущая отделом высоковольтных импульсных конденсаторов ИИПП НАН Украины. Окончила инженерно-физический факультет Харьковского политехнического института в 1972 г.

Топоров Сергей Олегович – инженер I категории ИИПП НАН Украины. Окончил электротехнический факультет Украинского государственного морского университета в 1994 г.

Фещук Татьяна Анатольевна – инженер-технолог II категории ИИПП НАН Украины. Окончила электроэнергетический факультет Харьковского политехнического института в 1987 г.

Выбор технологии пропитки обмоток электродвигателей

МАЗУРОВ В.Л., ЯКИМЕЦ П.П.

Сделан анализ разных методов пропитки электродвигателей. Рекомендован оптимальный, по мнению авторов, метод пропитки.

Different methods of electric motors impregnation were carried out. Under author s opinion the optimal method was recommended.

Требование повышения долговечности и надёжности электрических машин заставляет всё больше внимания уделять вопросам, связанным с их пропиткой. Процесс пропитки является одним из наиболее трудоёмких при изготовлении электродвигателей и во многом определяет их ресурсные характеристики.

При пропитке за счёт адгезии и механических характеристик пропиточных составов образуется связь элементов системы изоляции (эмалированный провод, корпусная и межфазная изоляция) между собой и с конструкционными материалами. Пропиткой обмотки достигается повышение электроизоляционных свойств, увеличение теплопроводности, защита от воздействия влаги, агрессивной окружающей среды, а также цементация обмотки, что предохраняет её и элементы системы изоляции от механических воздействий при вибрации, электродинамических усилиях, ударах и т.п.

Создание надёжных и долговечных электрических машин требует не только совершенствования пропиточных материалов, но и применение способов пропитки, обеспечивающих наилучшее качество изготавливаемых электродвигателей. В настоящее время при производстве электродвигателей используют-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ся в основном три метода пропитки: **погружение, вакуум-нагнетательный, струйный полив (капельный метод).**

Первый способ исключительно прост и заключается в том, что предварительно нагретый статор помещается на определённое время в ванну с пропиточным составом с последующей сушкой в печи.

Недостатком этого метода является плохое проникновение лака в обмотку, особенно с проводами малого диаметра, низкая производительность и высокая пожаровзрывоопасность, загазованность.

Вакуум-нагнетательный метод пропитки наиболее ярко представлен установкой AVB.

Установка состоит из зоны предварительного нагрева, автоклава и зон термообработки (сушки) пропитанных статоров. Все зоны связаны конвейером с определённым тактом движения.

Установка капельной пропитки представляет собой определённое количество позиций (в зависимости от габарита электродвигателя), расположенных по кругу. Нагрев на всех позициях токовый.

Пропиточный состав (компаунд) подаётся из сопла на верхнюю лобовую часть обмотки статора, находящегося в наклонном положении, на двух позициях. На третьей позиции компаунд подаётся внутрь на нижнюю лобовую часть обмотки статора, находящегося в горизонтальном положении. На последующих позициях ведётся термообработка пропитанных статоров.

К настоящему времени многие вопросы, связанные с пропиткой электродвигателей, не решены. Это проявляется в том, что нет объективных показателей по которым можно судить о качестве пропитки, нет неразрушающих методов их определения, нет единого мнения какова же должна быть структура пропитанного паза.

Говоря о качестве пропитки обычно подразумевается степень заполнения пазовых частей обмотки, цементация проводом элементов системы изоляции пропиточным составом. На степень заполнения паза и цементацию основное влияние оказывают природа, агрегатное состояние пропиточного состава и технология пропитки.

Исходя из этого, можно предположить, что при пропитке лаками с растворителями, погружением или вакуум-нагнетательным методом заполнение паза не будет сплошным, будет так называемая сотовая структура.

Это объясняется тем, что при пропитке этими методами лак после извлечения статора из пропиточной ванны вытекает из обмотки. В процессе сушки из пропиточного лака, остающегося в обмотке, улетучивается растворитель и в результате лак остается только на поверхности соприкасающихся с ним элементов (рис.2).

Рис.2. Часть шлифа обмотки статора, пропитанного на установке AVB:
1 – провод; *2* – эмаль-лак; *3* – пропиточный состав; *4* – вспененная часть пропиточного состава

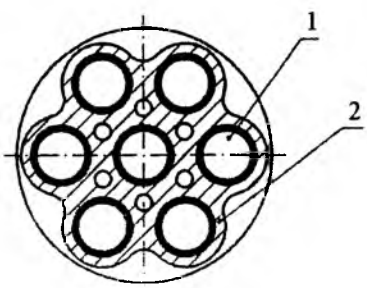


Рис.1. Разрез паза с "сотовой" структурой: *1* – эмалированные провода; *2* – пропиточный лак

Рис.3. Часть пакета статора, пропитанная на установке AVB

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Рис.4. Часть шлифа с "монолитной" структурой паза:
1 – провод; *2* – эмаль-лак; *3* – пропиточный состав

При этих методах пропитки происходит цементация обмотки, склеивание пакета (рис.3), что улучшает многие характеристики электродвигателя и увеличивает долговечность его работы.

Капельная пропитка подразумевает, ввиду отсутствия растворителя, полное заполнение обмотки, создание так называемой монолитной структуры паза (рис.4).

Однако при этом методе пропитки изначально закладывается непопадание пропиточного состава между пазовой изоляцией и пакетом статора в пазу (рис.5).

Кроме этого, обмотка статора не представляет собой строго упорядоченную структуру, а имеет много перекрещиваний проводников.

Пропиточный состав, подаваемый на верхнюю лобовую часть, при стекании по пазу в нижнюю лобовую часть в местах перекрещиваний не попадает на нижележащие проводники и, как видно из рис.6, не скрепляет должным образом проводники обмотки в пазу.

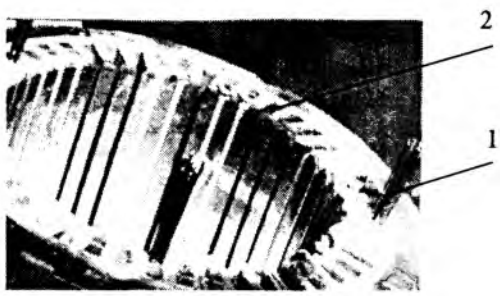


Рис.5. Пакет статора, пропитанный капельным методом:
1 – свободно извлекаемая пазовая часть; *2* – паз статора после извлечения обмотки

Рис.6. Пазовая часть обмотки, пропитанная капельным методом

Особенно это характерно для обмоток с диаметром провода более 1,0 мм. Поэтому удовлетворительное заполнение лобовых частей пропиточным составом не гарантирует хорошее заполнение пазовой части обмотки. Ещё одним недостатком можно считать необходимость тщательного расчёта, подбора и соблюдения температурного режима пропитки и термообработки. Так, при заниженной температуре компаунд будет недополимеризован, а при завышенной – преждевременно зажелируется и будет препятствовать дальнейшему прохождению компаунда в обмотку. Сравнительная оценка заполнения паза пропиточным составом этими же методами пропитки производилась на шлифах. При капельной пропитке для компаунда КП-50 коэффициент заполнения паза находится в пределах 0,82–0,93, для лака ПЭ-993 от 0,67 до 0,75.

Типовые испытания, проведённые на выборке из 8 двигателей с ВОВ 180 на каждый метод, показали, что превышение температуры обмотки статоров, пропитанных капельным методом (табл.1), выше, чем у пропитанных на AVB и среднее значение составляет соответственно 91,8 и 89,85°С.

Исходя из сказанного, на наш взгляд, предпочтительней является пропитка вакуум-нагнетательным методом. Однако применяемая в настоящее время двукратная пропитка электродвигателей имеет ряд недостатков. К ним относятся: 1) длительный цикл пропитки; 2) высокий расход электроэнергии; 3) высокий расход растворителя и, как следствие, повышенная загазованность производственного помещения и выбросы в атмосферу.

Для выяснения возможности устранения этих недостатков и повышения экономичности процесса пропитки и сушки электродвигателей проводилось технологическое опробование однократной пропитки лаками повы-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 1

Результаты испытаний двигателей с ВОВ 180

Параметр	Двигатель								
	6971	6972	6906	6869	6973	6866	6952	6868	Среднее значение
Превышение температуры обмотки статора, приведённое к номинальному току $Q'_{общ}$, °С	87	85,3	83	86,6	86,4	84	84,5	92	86,36
Сопротивление изоляции обмотки статора в холодном / горячем состоянии $r_{изм.ст}$, МОм	500/300	500/300	500/400	500/300	500/500	500/500	500/500	500/500	
Превышение температуры обмотки статора Q, °С	90,8	89,6	88,2	94,1	88,9	88,3	83,3	95,6	89,85
Установка струйного полива УПС (капельный метод) лак КП-50									
	6867	6890	6887	6926	6904	6953	6909	6889	Среднее значение
Превышение температуры обмотки статора, приведённое к номинальному току $Q'_{общ}$, °С	87,4	87,1	88,1	88,4	92,4	88,1	87,7	88,2	88,42
Сопротивление изоляции обмотки статора в холодном / горячем состоянии $r_{изм.ст}$, МОм	500/500	500/500	500/500	500/500	500/500	500/500	500/500	500/500	
Превышение температуры обмотки статора Q, °С	91,8	89,9	92,2	91,3	95	91	92,1	91,1	91,8

Таблица 2

Среднее значение ΔC, ΔP и tgδ у статоров с ВОВ 132

Параметр	Двукратная пропитка		Однократная пропитка	
	17 с	30 с	40 с	50 с
Привес лака в статоре ΔP, кг	0,256	0,245	0,209	0,172
Приращение электрической ёмкости ΔC, пФ	0,135	0,133	0,144	0,08
Тангенс угла диэлектрических потерь tgδ	0,011	0,009	0,011	0,011
Температура предварительного нагрева статора, °С	125	125	125	125
Коэффициент заполнения паза лаком, %	23,9	23,3	19,7	16,2

Таблица 3

Сравнение характеристик при одно- и двукратной пропитке электродвигателей с ВОВ 132

Параметр	Двигатель										
	15573	15575	15578	15597	15802	15596	15579	15604	15562	15595	Среднее значение
Однократная пропитка											
Потери в стали, Вт	535	423	357	404	393	459	772	559	420	422	474
Превышение температуры в обмотке статора, °С	92,8	81,2	73,3	94,6	82,5	88,8	97,3	84,7	80,3	80,7	85,6
Привес ΔP, кг	0,3	0,35	0,25	0,25	0,28	0,3	0,28	0,25	0,25	0,28	0,27
Приращение электрической ёмкости ΔC, пФ	0,14	0,16	0,14	0,15	0,135	0,125	0,155	0,16	0,16	0,15	0,153
Двукратная пропитка											
	16004	16022	15943	15945	15941	15887	15888	15959	15958		Среднее значение
Потери в стали, Вт	595	447	407	421	365	399	607	421	516		464
Превышение температуры в обмотке статора, °С	83,8	77,2	80,1	76,7	75,1	77,7	93,2	77,3	79,3		79
Привес ΔP, кг	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,35	0,4	0,3	0,5		0,394
Приращение электрической ёмкости ΔC, пФ	0,19	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,2	0,2	0,21		0,2

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

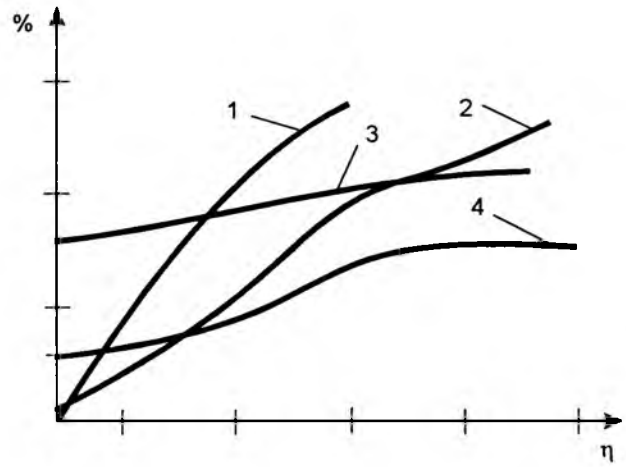


Рис.7. Зависимость вязкость – сухой остаток: 1, 2 – МГМ-8; 3 – МЛ-92; 4 – ГФ-95

шенной вязкости. Для выбора оптимальной вязкости было проведено определение зависимости вязкости и содержания сухого остатка. Из рис.7 видно, что содержание сухого остатка даже при вязкости 17 с значительно. Проведённый подбор вязкости на статорах с ВОВ 132 показал, что оптимальной является вязкость 30 с (табл.2). Из табл.2 видно, что пропитка лаками с более высокой вязкостью ведёт к снижению привесов и коэффициента заполнения паза.

Для подтверждения этих выводов была проведена пропитка электродвигателей с ВОВ 132 двукратно лаком с вязкостью 17 с и однократно с вязкостью 30 с. Визуальный осмотр различий между одно- и двукратной пропиткой не выявил. Отобранные электродвигатели (по 8 штук из каждой пропитки) проходили типовые испытания. Результаты этих испытаний (табл.3) показывают, что двукратная пропитка является предпочтительной.

Выводы

1. Пропитка вакуум-нагнетательным способом более качественна.

2. Для электродвигателей, работающих в более тяжёлых и специфических условиях, рекомендуется двукратная пропитка.

Якимец Пётр Петрович – научный сотрудник отдела по исследованию материалов ОАО "НИПТИЭМ", ведущий технолог ООО "НормИнфо". Окончил Владимирский политехнический институт в 1971 г. по специальности инженер-технолог по переработке пластмасс.

Мазуров Вадим Львович – заместитель заведующего отделом исследования материалов ОАО "НИПТИЭМ", директор ООО "НормИнфо".

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЁТЫ

Исследование дифференциального электромагнитного датчика со сплошным магнитопроводом в нагрузочном режиме

МАМЕДОВ Ф.И., доктор техн. наук, ДАДАШЕВА Р.Б., канд. техн. наук, ГУСЕЙНОВ Р.А., инж.

Сумгаитский государственный университет

Рассмотрена магнитная система дифференциального электромагнитного датчика малых линейных перемещений с магнитопроводом из сплошной стали при различных нагрузочных режимах. Исследование магнитного поля датчика проведено с учётом поверхностного эффекта в теле магнитопровода датчика. Получена формула активной нагрузки на выходе датчика и построена характеристика зависимости $R_{н.н} = F(r/\omega L_а)$.

В информационно-измерительных системах различных областей народного хозяйства применяются первичные элементы (датчики) физических величин, предназначенные для преобразования неэлектрических параметров в электрические сигналы [1].

В настоящее время в системах управления нефтедобывающей промышленности приме-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

няются дифференциальные электромагнитные датчики со сплошным магнитопроводом [2]. Такие датчики могут работать при различных видах нагрузок, исследование которых мало освещено в технических литературных источниках. В связи с этим в данной статье рассматривается вопрос исследования дифференциального электромагнитного датчика со сплошным магнитопроводом (ДЭМДСМ) при различных нагрузочных режимах.

Рассматриваемый ДЭМДСМ предназначен для измерения малых линейных перемещений в пределе от нуля до $0{,}5\cdot10^{-3}$ м (рис.1).

Как видно из рис.1, датчик состоит из двух идентичных неподвижных сердечников *1*, *2*, подвижного сердечника *3*, из двух опорных шайб *4*, *5*, первичных обмоток (обмоток возбуждения) *6*, *7*, противодействующей пружины 8, вторичных обмоток (измерительных обмоток) *9*, *10*, регулировочного штока *13*. Все узлы датчика собраны в корпусе *11*, *12*.

В каждой катушке уложены обмотка возбуждения и измерительная обмотка.

В рассматриваемом датчике воздушные зазоры δ_1 и δ_2 измеряются между торцами подвижного сердечника и внутренней стенки сердечника.

Датчик работает по следующему принципу: при перемещении подвижного сердечника под действием регулировочного штока напряжение измерительной обмотки одной половины возрастает, а другой уменьшается. Вследствие этого в общей цепи действует результирующее напряжение U_2, равное разности частичных напряжений.

При указанном реальном конструктивном исполнении датчика чувствительность равна 0,1–0,12 мВ/мкм, что удовлетворяет требованию практики.

Принципиальная электрическая схема датчика представлена на рис.2.

Датчик содержит две первичные и две вторичные обмотки, выполненные идентично. При этом

$$L_1' + L_1'' = L_1;\ L_2' + L_2'' = L_2;\ r_1' + r_1'' = r_1;\ r_2' + r_2'' = r_2;$$

$$M_1 \neq M_2.$$

Точки, указанные на обмотках, показывают начало обмоток, т.е. первичные обмотки соединены между собой последовательно согласно, а вторичные обмотки последовательно встречно.

Первичные обмотки подключаются к источнику переменного тока с частотой 50 Гц. С выходной цепи снимается напряжение $\dot{U}_2$ с такой же частотой.

Магнитная система датчика выполнена со сплошным магнитопроводом из конструкционной стали Ст20 или Ст45, обладающей низкой магнитной проницаемостью.

В процессе работы магнитопровод датчика находится в переменном магнитном поле, и в его теле наблюдается сильно выраженный поверхностный эффект, т.е. в каждой части поперечного сечения магнитопровода магнитный поток распространяется неравномерно. Однако при этом линейность между напряжениями $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ сохраняется. Это объясняется тем, что в путях магнитных потоков, созданных токами $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$, имеется

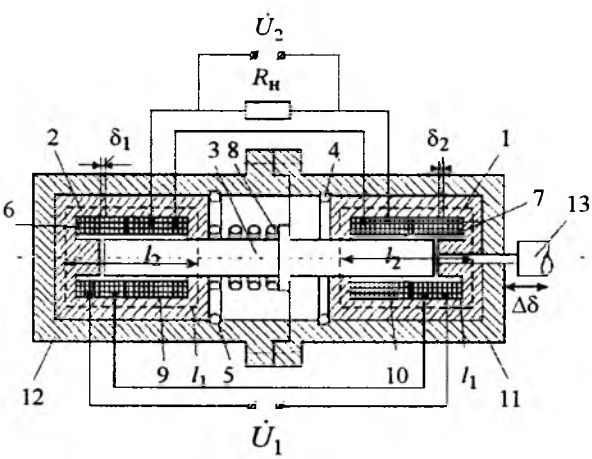


Рис.1

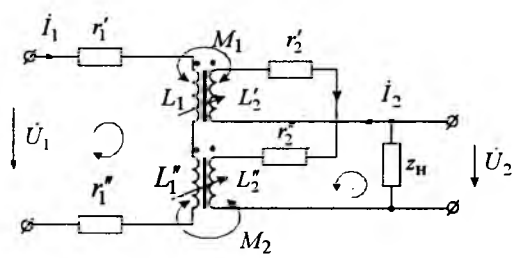


Рис.2

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

воздушный зазор, где падает большая часть напряжённости магнитного поля. При этом меньшая часть напряжённости магнитного поля попадает в тело магнитопровода, т.е. он работает на линейном участке кривой намагничивания магнитопровода.

В соответствии с изложенными в комплексном виде [3]

$$L_1' = L_{1a}' - jL_{1p}';\ L_2' = L_{2a}' - jL_{2p}';$$
$$L_1'' = L_{1a}'' - jL_{1p}'';\ L_2'' = L_{2a}'' - jL_{2p}''; \quad (1)$$

$$M_1 = M_{1\alpha} - jM_{1p};\ M_2 = M_{2\alpha} - jM_{2p}, \quad (2)$$

где $L_{1a}, L_{2a}, M_{1a}, M_{2a}$ – активные составляющие индуктивностей и взаимоиндуктивностей первичной и вторичной обмоток; L_{1p}, L_{2p}, M_{1p}, M_{2p} – реактивные составляющие индуктивностей и взаимоиндуктивностей системы обмоток.

Активные составляющие индуктивностей системы обмоток датчика физически характеризуют реактивную энергию в магнитной системе. Активные части взаимоиндуктивностей характеризуют передачу части реактивной энергии от первичной обмотки во вторичную цепь датчика.

Реактивные составляющие индуктивностей и взаимоиндуктивностей физически характеризуют активные сопротивления, приведённые к системе обмоток.

Учитывая сказанное, уравнения равновесия согласно рис.2 записываем в виде:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1(r_1 + \omega L_{1p} + j\omega L_{1a}) - \dot{I}_2[\omega(M_{1p} - M_{2p}) + j\omega(M_{1a} - M_{2a})];$$
$$-\dot{U}_2 = -\dot{I}_1[\omega(M_{1p} - M_{2p}) + j\omega(M_{1a} - M_{2a})] + \dot{I}_2[r_2 + \omega L_{2p} + j\omega L_{2a}]. \quad (3)$$

Подставив в (3) $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 z_н$, выразим из второго уравнения (3) $\dot{I}_2$ через $\dot{I}_1$ и, подставив в первое уравнение получим:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{r_1 + \omega L_{1p} + j\omega L_{1a} + \dfrac{\omega^2[M_{1a} - M_{2a} - j(M_{1p} - M_{2p})]^2}{r^2 + \omega L_{2p} + z_A + j\omega L_{2a}}}$$

или

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{r_1 + \omega L_{1p} + j\omega L_{1a} + \dfrac{\omega^2(M_a^2 - M_p^2 - j2M_aM_p)}{r_2 + \omega L_{2p} + z_н + j\omega L_{2a}}}, \quad (4)$$

где

$$M_a = M_{1a} - M_{2a};\ M_p = M_{1p} - M_{2p}.$$

Зная $\dot{I}_1$, находим выходное напряжение $\dot{U}_2$ датчика:

$$\dot{U}_2 = \frac{U_1(\omega M_p + j\omega M_a)z_н}{(r_1 + \omega L_{1p} + j\omega L_{1a})(r_2 + \omega L_{2p} + j\omega L_{2a}) + \omega^2(M_a^2 - M_p^2) - j2\omega^2 M_a M_p}, \quad (5)$$

где

$$L_{1a} = L_{1a}' + L_{1a}'';\ L_{1p} = L_{1p}' + L_{1p}'';\ L_{2a} = L_{2a}' + L_{2a}'';$$
$$L_{2p} = L_{2p}' + L_{2p}''.$$

Разложение числителя и знаменателя дроби (5) производится в зависимости от характера сопротивления нагрузки $z_н$, которое может иметь активный, индуктивный или ёмкостной характер.

В системах управлений промышленных предприятий такие датчики обычно включаются на нагрузку активного характера. Поэтому принимаем, что $z_н = R_н$. При этом формула (5) после некоторых преобразований записывается в виде:

$$\dot{U}_2 = \frac{U_1(a_1 + jb_1)}{a_2 + jb_2}, \quad (6)$$

где

$$a_1 = \omega R_н M_p;\ b_1 = \omega R_н M_a;$$

$$a_r = (r_1 + \omega L_{1p})(r_2 + \omega L_{2p} + R_н) - \omega^2 L_{1a}L_{2a} + \omega^2(M_a^2 - M_p^2);$$

$$b_2 = \omega L_{2a}(r_1 + \omega L_{1p}) + \omega L_{1a}(r_2 + \omega L_{2p} + R_н) - 2\omega^2 M_a M_p.$$

Переходя от алгебраической формы комплексных чисел к показательной, для $\dot{U}_2$ получим:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1\sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{a_2^2 + b_2^2}}\, e^{j(\varphi_u + \varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (7)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где φ_u – угол сдвига напряжения $\dot{U}_1$; $\varphi_1 = \mathrm{arctg} b_1 / a_1$; $\varphi_2 = \mathrm{arctg} b_2 / a_2$.

Для дальнейшего анализа можем использовать модульные значения напряжения:

$$U_2 = U_1 \frac{\omega\sqrt{M_р^2 + M_а^2} R_н}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2}}. \quad (8)$$

Рассмотрим три режима работы датчика. В режиме КЗ $R_н = 0$ и напряжение $U_2 = 0$.

При рабочем нагрузочном режиме датчика $z_н = R_{н.н}$ и

$$U_{2н} = U_1 \frac{\omega\sqrt{M_р^2 + M_а^2} R_{н.н}}{\sqrt{(a_{2н})^2 + (b_{2н})^2}}, \quad (9)$$

где

$$a_{2н} = (r_1 + \omega L_{1р})(r_2 + \omega L_{2р} + R_{н.н}) - \omega^2 L_{1а} L_{2а} + \omega^2 (M_а^2 - M_р^2); \quad (10)$$

$$b_{2н} = \omega[L_{2а}(r_1 + \omega L_{1р}) + L_{1а}(r_2 + \omega L_{2р} + R_{н.н})] - 2\omega^2 M_а M_р. \quad (11)$$

При $z_н = R_н = \infty$ датчик работает в режиме ХХ, соответственно числитель и знаменатель дроби (8) превращаются в неопределённость. После раскрытия этой неопределённости получаем:

$$U_{20} = U_1 \frac{\omega\sqrt{M_р^2 + M_а^2}}{\sqrt{(a_{20})^2 + (b_{20})^2}}, \quad (12)$$

где

$$a_{20} = r_1 + \omega L_{1р};\ b_{20} = \omega L_{1а};\ \varphi_{20} = \mathrm{arctg}\frac{\omega L_{1а}}{r_1 + \omega L_{1р}}.$$

Подставляя эти значения в (12), находим:

$$U_{20} = U_1 \frac{\omega\sqrt{M_р^2 + M_а^2}}{\sqrt{(r_1 + \omega L_{1р})^2 + (\omega L_{1а})^2}}. \quad (13)$$

Значение напряжения U_{20}, определённое по (13), больше, чем $U_{2н}$, рассчитанное по (9). Производя некоторые преобразования в (13), получаем:

$$U_{20} = U_1 \frac{\sqrt{M_р^2 + M_а^2}}{L_{1а}\sqrt{1 + П^2}}, \quad (14)$$

где

$$П = \frac{r_1 + \omega L_{1р}}{\omega L_{1а}}.$$

Параметры $L_{1а}$, $L_{1р}$, $L_{2а}$, $L_{2р}$, $M_{1а}$, $M_{1р}$, $M_{2а}$ $M_{2р}$ определяются в зависимости от конструктивного выполнения электромагнитной системы датчика.

Как отмечено выше, значительный интерес представляет нормальный режим датчика при подключении к его выходу активного сопротивления $R_{н.н}$. При этом возникает необходимость определить значение $R_{н.н}$, соответствующее минимальному модулю напряжения U_2.

Для этого следует дифференцировать (9) по $R_{н.н}$. При выполнении этой операции производим преобразования в формулах $a_{2н}$ и $b_{2н}$. Члены (10), не содержащие $R_{н.н}$, обозначим n_1, а коэффициент при $R_{н.н}$ – n_2. Аналогичным образом в (11) члены, не содержащие $R_{н.н}$, обозначим n_3, а коэффициент при $R_{н.н}$ – n_4.

Учитывая это и производя преобразования в (9), после группировки по $R_{н.н}$ и $R_{н.н}^2$, получаем:

$$U_2 = U_1 \frac{m R_{н.н}}{\sqrt{m_1 + m_2 R_{н.н} + m_3 R_{н.н}^2}} = U_1 F(R_{н.н}), \quad (15)$$

где

$$m_1 = n_1^2 + n_3^2;\ m_2 = 2(n_1 n_2 + n_3 n_4); \quad (16)$$

$$m_3 = (n_2^2 + n_4^2); \quad (17)$$

$$n_1 = (r_1 + \omega L_{1р})(r_2 + \omega L_{2р}) + \omega^2 (M_а^2 - M_р^2 - L_{1а} L_{2а});$$

$$n_2 = r_1 + \omega L_{1р};$$

$$n_3 = \omega[L_{2а}(r_2 + \omega L_{2р}) + (r_1 + \omega L_{1р}) L_{2а}] - 2\omega^2 M_а M_р;$$

$$n_4 = \omega L_{1а};\ m = \omega\sqrt{M_а^2 + M_р^2}.$$

Приравняв производную от $F(R_{н.н})$ по $R_{н.н}$ к нулю, после некоторых преобразований получим:

$$R_{н.н} = -\frac{2m_1}{m_2}. \quad (18)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Подставляя (18) в (15), находим:

$$F(R_{н.н}) = -\frac{2m_1 m}{m_2\sqrt{2m_3\frac{m_1^2}{m_2^2} - m_1}}. \qquad (19)$$

Здесь выполняется неравенство

$$2m_3\frac{m_1^2}{m_2^2} > m_1$$

и соответственно этому подкоренное выражение получается положительным.

При этом формула (19) показывает условие получения минимального значения напряжения $\dot{U}_2$.

Подставив в (18) значения m_1, m_2 и m_3 из (16) и (17), найдём:

$$R_{н.н} = \frac{[(r_1+\omega L_{1р})(r_2+\omega L_{2р})+ +\omega^2(M_а^2 - M_р^2 - L_{1а}L_{2а})]^2 + +[\omega L_{2а}(r_1+r_2+\omega L_{2р}+\omega L_{1р}) - -2\omega^2 M_а M_р]^2}{[(r_1+\omega L_{1р})(r_2+\omega L_{2р})+ +\omega^2(M_а^2 - M_р^2 - L_{1а}L_{2а})](r_1+\omega L_{1р}) + +[\omega L_{2а}(r_1+r_2+\omega L_{2р}+\omega L_{1р}) - -2\omega^2 M_а M_р]\omega L_{1р}}. \qquad (20)$$

Поскольку числа витков первичной и вторичной обмоток одинаковы, то

$$r_1 - r_2 = r;\ L_{1р} = L_{2р} = L_р;\ L_{1а} = L_{2а} = L_а.$$

Принимаем, что

$$M_1 = k_1\sqrt{L_1' L_2'};\ M_2 = k_2\sqrt{L_1'' L_2''}. \qquad (21)$$

В процессе работы датчика суммарная индуктивность первичных обмоток остаётся постоянной, т.е. $L_1' + L_1'' = \text{const}$, так как эти обмотки соединены между собой последовательно согласно.

Первичные и вторичные обмотки расположены так, чтобы коэффициенты связи k_1 и k_2 получились равными единице.

После некоторых преобразований формулы (21) с учётом (14) получаем:

$$M_1 = \sqrt{\sqrt{(L_а' L_{2а}' - L_{1р}' L_{2р}')^2 + (L_{1а}' L_{2р}' + L_р' L_{2а}')^2}} \times \times e^{-j\varphi_{1m/2}} = |M_1|e^{-j\varphi_{1m/2}}, \qquad (22)$$

где

$$\varphi_{1m} = \text{arctg}\frac{L_{1а}' L_{2р} + L_{1р}' L_{2а}'}{L_{1а}' L_{2а}' - L_{1р} L_{2р}}.$$

Согласно (22)

$$M_1 = |M_1|\cos\varphi_{m/2} - j|M_1|\sin\varphi_{m/2}.$$

Аналогичным образом подставляя (1) и (2) в (21), находим

$$M_{2а} = |M_2|\cos\varphi_{m/2};\quad M_{2р} = |M_1|\sin\varphi_{m/2};$$

$$|M_2| = \sqrt{\sqrt{(L_{1а}'' L_{2а}'' - L_{1р}'' L_{2р}'')^2 + (L_{2а}'' L_{2р}'' + L_{1р}'' L_{2а}'')^2}};$$

$$\varphi_m = -\text{arctg}\frac{L_{1а}'' L_{2р}'' + L_{1р}'' L_{2а}''}{L_{1а}'' L_{2а}'' - L_{1р}'' L_{2р}''}.$$

Если $L_{1а}' = L_{1р}' = L_{2а}' = L_{2р}'$ и $L_{1а}'' = L_{1р}'' = L_{2а}'' = L_{2р}''$, то

$$\varphi_{1m} = \varphi_{2m} = \frac{\pi}{4};\ M_1 = L_{1а}'\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}};\ M_2 = L_{2а}'\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}};$$

$M_а = M_р$.

Тогда формула (20) записывается в виде:

$$R_{н.н} = \frac{(r^2 + 2r\omega L_{1а}')^2 + (2\omega L_{1а}' r + 2\omega^2 L_{1а}'^2 - 2\omega^2 M_а^2)^2}{(r^2 + 2r\omega L_{1а}')(r_1 + \omega L_{1р}) + +(2\omega L_{1а}' r - 2\omega^2 M_а^2 + 2\omega^2 L_{1а}^2)\omega L_{1а}'}.$$

После некоторых преобразований

$$R_{н.н} = 2r\frac{1 + \frac{r}{2\omega L_{1а}'} + \frac{r^2}{8\omega^2 (L_{1а}')^2}}{1 + \frac{3}{4}\frac{r}{\omega L_{1а}'} + \frac{r^2}{4\omega^2 (L_{1а}')^2}}. \qquad (24)$$

Формула (24) позволяет определить значение нагрузочного сопротивления $R_{н.н}$, обеспечивающего получение минимального напряжения на выходе датчика в зависимости от отношений $\frac{r}{\omega L_а}$ (рис.3).

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

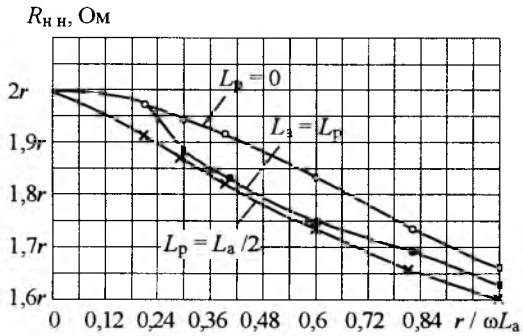


Рис.3

Зависимость (рис.3) получена для случая отсутствия вихревых токов в магнитопроводе, т.е. при $L_p = 0$. При равенстве потерь на вихревые токи и реактивной мощности, т.е. $L_p = L_a$, и в случае, когда $L_p = L_a / 2$, характеры изменений зависимостей $R_{н.н} = F\left(\frac{r}{\omega L_a}\right)$ не сильно отличаются. Характеристика, полученная при $L_p = 0$, изменяется меньше, чем при $L_p = L_a$ и $L_p = L_{a/2}$.

Список литературы

1. **Агейкин Д.И., Костина К.Н., Кузнецова Н.Н.** Датчики контроля и регулирования. М.: Машиностроение, 1965.

2. **Алиев Т.М., Гринберг М.М., Едуш В.Я. и др.** Новые системы телединамометрирования глубинно-насосных скважин. М.: ВНИИОЭНГ, 1967.

3. **Мамедов Ф.И., Дадашева Р.Б.** Аналитическое определение параметров индуктивного датчика линейных и угловых перемещений // Электротехника. 2002. № 11. С.53–58.

Диагностика локационным методом состояния электрических кабельных линий при их прожиге

МИНУЛЛИН Р.Г., ФАРДИЕВ И.Ш.

Обсуждаются дистанционные и топографические методы определения места повреждения электрических кабельных линий, среди них выделяется локационный метод. Рассматриваются технические возможности разных типов рефлектометров, предназначенных для локационного зондирования электрических линий. Описывается методика локационного зондирования кабельных линий. Приводятся рефлектограммы кабеля до и после прожига, подробно анализируются их особенности, характеризующие состояние кабеля.

Here are discussed the features of distant and topographic methods of detection of damage sites of electric cables. Authors discuss the technical characteristics of different types of reflectometers for location probing of electric power lines. The method of the cable location probing is described. The examples of cable reflectograms before and after its shorting are given and analyzed.

Способы определения места повреждения кабелей

Процедура определения места повреждения (ОМП) в кабельных линиях состоит из двух операций: дистанционное ОМП и топографическое (трассовое) ОМП.

Дистанционное ОМП заключается в измерении расстояния до места повреждения от конца или концов линии. Однако любое дистанционное ОМП обладает ограниченной точностью. Обычно длина кабельной линии, уложенной в траншее без натяга ("змейкой"), и длина трассы не соответствуют друг другу. Степень удлинения кабеля за счёт такой непрямолинейной укладки учесть очень трудно. Поэтому даже при хорошо ведущейся документации нельзя указать на трассе точку, соответствующую точному расстоянию от конца кабельной линии, с погрешностью меньше 1–2% [1, 2].

Абсолютная погрешность для ОМП подземных кабельных линий не должна превышать ±3 м. Даже для коротких кабельных линий удовлетворить этому требованию при-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

менением только одного дистанционного ОМП не удаётся. Дистанционным методом определяется зона, в пределах которой находится повреждение. Для точного нахождения места повреждения необходим еще один метод ОМП – топографический (трассовый).

Погрешность современных топографических методов для кабельных линий не ниже ±3 м. При этом широко применяются индукционные и акустические методы, но они требуют создания токовой петли путём прожига (замыкания) жил кабеля между собой или на оболочку кабеля. Однако ограничиться использованием только топографических методов, обеспечивающих необходимую точность, тоже нельзя, так как при этом не удовлетворяются требования быстроты ОМП (не более нескольких часов). При использовании только топографических методов необходимо перемещаться со специальной аппаратурой по всей трассе кабельной линии. Знание же зоны повреждения позволяет ограничиться поисками в пределах этой зоны, при этом время поиска резко сокращается [1–4].

Среди дистанционных методов особое место занимает локационный метод, который основан на измерении времени между моментом посылки в линию зондирующего электрического импульса и моментом прихода к началу линии импульса, отражённого от места повреждения (неоднородности волнового сопротивления линии) [5–7]. При этом измеряют интервал $t_л$ – время двойного пробега импульсом расстояния до места повреждения. Тогда искомое расстояние до места повреждения

$$l = \frac{t_л}{2} v,$$

где v – скорость распространения импульса в линии.

Локационный метод подразделяется на импульсный и волновой. При импульсном методе длительность зондирующих импульсов меньше, а при волновом больше, чем время прохождения импульсом возможного расстояния между неоднородностями линии.

Аппаратные средства

При реализации метода локационного зондирования выполняются следующие операции:

1) зондирование линии импульсами напряжения;

2) приём импульсов, отражённых от места повреждения и от неоднородностей волнового сопротивления;

3) выделение импульсов, отражённых от места повреждения, на фоне помех (случайных и отражений от неоднородностей линии) [7–15];

4) определение расстояния до места повреждения по временно́й задержке отражённого от него импульса относительно зондирующего.

Все эти операции реализуются в приборе, получившем название рефлектометр или измеритель неоднородностей линий.

С генератора импульсов рефлектометра зондирующие импульсы подаются в линию. Отражённые импульсы поступают с линии в приёмник, в котором производятся необходимые преобразования. С выхода приёмника преобразованные сигналы поступают на графический индикатор. Все блоки рефлектометра функционируют по сигналам блока управления. На графическом индикаторе рефлектометра воспроизводится рефлектограмма линии – реакция линии на зондирующий импульс. Анализируя рефлектограмму линии, можно судить о наличии или отсутствии в ней повреждений и неоднородностей.

Основное назначение рефлектометров – поиск повреждений и диагностика силовых кабельных линий, а также линий связи, электропередачи, контроля и управления [7].

Современный парк рефлектометров достаточно велик.

По своему назначению рефлектометры можно разделить на группы:

1) рефлектометры, предназначенные для работы на линиях электропередачи (кабельных и воздушных);

2) универсальные рефлектометры, способные работать как на линиях электропередачи, так и на линиях связи, контроля и управления.

Современные рефлектометры имеют портативное исполнение и в них широко применяются специализированные микросхемы и жидкокристаллические дисплеи. На предприятиях электрических сетей продолжают ещё использоваться рефлектометры старых моде-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

лей с электронно-лучевыми трубками (Р5-15, Р5-17, Р5-23, К6Р-5 и подобные им), но будущее им не принадлежит.

Основными мировыми производителями рефлектометров являются иностранные фирмы [7]. Лидерство в этой области занимают фирмы: "Hagenuk KMT" (Германия), "Seba dynatronic" (Германия), "Bicotest" (Англия), "Riser Bond" (США). Основной производитель рефлектометров в нашей стране фирма "Стэлл" (г. Брянск).

К группе приборов, предназначенных для работы на линиях электропередачи, можно отнести: импульсный рефлектометр РИ-10М или ИР-10М (ЗАО "Эрстед", г. Санкт-Петербург), рефлектометры серии Miniflex HV и Teleflex M (фирма "Hagenuk KMT"), рефлектометр Kabellux 4T (фирма "Seba dynatronic"), систему поиска дефектов силовых кабелей S4000 BOXXER (фирма "Bicotest"). Приборы обеспечивают: обнаружение дефектов и неисправностей силовых кабелей; определение характера повреждений; измерение расстояний до неоднородностей и между неоднородностями волнового сопротивления кабеля; определение длин кабелей.

К группе универсальных приборов, предназначенных для диагностики силовых кабельных линий, а также кабелей связи, управления и контроля можно отнести следующие: локаторы неисправностей коммуникационных линий и силовых кабелей Т617, Т625 TDR и Т631 TDR, универсальный прибор для обнаружения мест повреждений в кабелях LEXXI T810E (фирма "Bicotest"), рефлектометры серий Easyflex и Digiflex Com (фирма "Hagenuk KMT"), рефлектометр Model 3440 (фирма "Radiodetection Corp.", США), измерители неоднородностей линий Р5-10, Р5-17, Р5-23, компьютерную систему определения дефектов линий К6Р-5, рефлектометры РЕЙС-105Р и РЕЙС-205 (фирма "Стэлл"). Приборы позволяют определять обрыв и короткое замыкание жил кабеля, места трещин в жилах, ухудшения изоляции, места заземления, места пониженного сопротивления, плохой стык, смятие и другие неоднородности, определять расстояние до места повреждения в кабеле.

Большинство современных рефлектометров независимо от специфики их применения используют в качестве зондирующего сигнала прямоугольный импульс, длительность которого лежит в диапазоне от 10 нс до 10 мкс, амплитуда импульса – от 3 до 25 В. В зависимости от технического исполнения того или иного прибора возможно либо дискретное, либо плавное изменение параметров зондирующего импульса.

Большинство производителей стараются выпускать универсальные приборы. Основной тенденцией является миниатюризация прибора с внедрением в него современных цифровых систем и использования в качестве дисплея жидкокристаллических экранов. В ряде приборов предусмотрена возможность хранения рефлектограмм, полученных при диагностике линии, а также возможность работы прибора совместно с компьютером. Небольшие размеры и масса позволяют производить диагностику линий в полевых условиях.

В результате анализа технических параметров рефлектометров можно сделать вывод, что наилучшим образом соответствуют требованиям универсальности, оперативности, удобства пользования, современности исполнения, стыковки с компьютером, дальности действия следующие приборы: РЕЙС-105Р, Т617, Т625 TDR, РИ10М, Kabellux 4T, ETDR 10, Digiflex Com.

Нашим требованиям для решения поставленных задач наиболее полно удовлетворяет рефлектометр РЕЙС-105Р (РЕЙС-205) фирмы "Стэлл" [7] .

Большинство линий распределительных сетей не превышает длины 25 км, и уменьшение амплитуды импульса на 5,5 дБ позволяет его устойчиво обнаруживать на дисплее рефлектометра РЕЙС-105Р. Прибор обеспечивает поиск повреждений и диагностику силовых кабельных линий, воздушных линий электропередачи, линий связи, контроля, управления и т.д.

РЕЙС-105Р по ряду своих технических характеристик (дальность действия 25 км, амплитуда зондирующего импульса 3,5 В, длительность импульса в пределах от 7 нс до 10 мкс, регулировка выходного сопротивления прибора в широких пределах от 20 до 470 Ом, объём памяти 250 рефлектограмм, автоматическая калибровка, растяжка участ-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ков рефлектограммы, цифровое накопление, наличие жидкокристаллического дисплея, удобство пользования) превосходит многие аналогичные приборы российского и зарубежного производства. Большим преимуществом РЕЙС-105Р является его относительно низкая стоимость по сравнению с зарубежными приборами, что играет немаловажную роль в современных условиях.

Прожиг кабеля и импульсное зондирование

Экспериментальные исследования кабельных линий осуществлялись на территории Казанских электрических сетей ОАО "Татэнерго". Измерения выполнялись на реальных фидерах, выведенных в режим ремонта. Из большого массива измерений для анализа выбраны 3 случая, которые являются наиболее характерными и рассматриваются ниже.

После дистанционного обнаружения зоны повреждения кабеля локационным методом необходимо определить точное местонахождение повреждения. Это осуществляется с помощью индукционных или акустических методов, которые требуют прожига (пробоя) кабеля высоковольтным напряжением для создания токового пути через место повреждения, как было сказано выше. Эффективность прожига кабеля контролируется локационным методом. До прожига все жилы кабеля, отключённые от обмоток трансформаторов, зондируются импульсными сигналами для нахождения поврежденной жилы. После прожига жилы кабеля вновь зондируются для оценки их состояния после высоковольтного пробоя.

Если зондирование данного кабеля происходит впервые, то необходимо предварительно выбрать оптимальную длительность зондирующего импульса в соответствии с полосой пропускания кабеля. На рис.1 приведены рефлектограммы, снятые до и после прожига кабеля длиной 560 м. Зондирование осуществлялось импульсами длительностью τ = 0,5; 0,75; 1,0 мкс в диапазоне измерений D = 640 м при коэффициенте укорочения кабеля K = 1,87.

На всех рефлектограммах в т. *А* представлены исходные зондирующие импульсы с длительностями τ, равными 0,5; 0,75 и 1,0 мкс (здесь и далее импульсы отсчитываются по началу переднего фронта). Анализируя форму импульсов в точках *Б* и *В* на рефлектограммах, снятых до прожига кабеля, можно сделать вывод, что для данного кабеля, исходя из его марки и длины, оптимальной является длительность зондирующего импульса, равная 0,75 мкс. При этой длительности отражённый импульс почти успевает достичь своего максимального амплитудного значения, т.е. создается наибольшее соотношение сигнал/шум. Импульс с длительностью 0,5 мкс не успевает достичь максимального значения и поэтому имеет несколько меньшую амплитуду, но он достаточно уверенно выделяется на рефлектограмме и при этом из-за меньшей длительности обеспечивается более высокая разрешающая способность (распознавание двух неоднородностей, находящихся рядом). Длительность импульса, равная 1,0 мкс, является избыточной, так как при этом соотношение сигнал/шум не повышается, но ухудшается разрешающая способность локационного метода.

Чтобы диагностика кабеля была более информативной, следует снимать рефлектограммы при подключении рефлектометра к линии для зондирования по схеме "фаза–земля (оболочка)" (левая часть рис.1) и по схеме "фаза–фаза" (правая часть рис.1).

Перед зондированием провода кабеля отключаются от питающих шин, а концы проводов – от трансформаторов и переводятся в режим холостого хода. Поэтому, как это видно из рефлектограмм $U_{A3}(l)$ и $U_{C3}(l)$ на левой части рис.1,*б* (зондирование по схеме "фаза–земля") и $U_{AC}(l)$ на правой части рис.1,*б* (зондирование по схеме "фаза–фаза"), концам разомкнутых неповреждённых фазных проводов *А* и *С* кабеля в т. *В* на расстоянии 560 м от начала кабеля соответствуют положительные импульсы.

Повреждение – обрыв на проводе фазы *В* обнаруживается на рефлектограмме $U_{B3}(l)$ (рис.1,*б*) в т. *Б* на расстоянии 350 м от начала кабеля в виде положительного импульса при его зондировании по схеме "фаза–земля". На рефлектограммах $U_{AB}(l)$ и $U_{BC}(l)$ (рис.1,*б*), полученных при зондировании по схеме "фаза–фаза", также видны положительные импульсы в т. *Б* на расстоянии 350 м, соответствующие обрыву на проводе фазы *В*.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

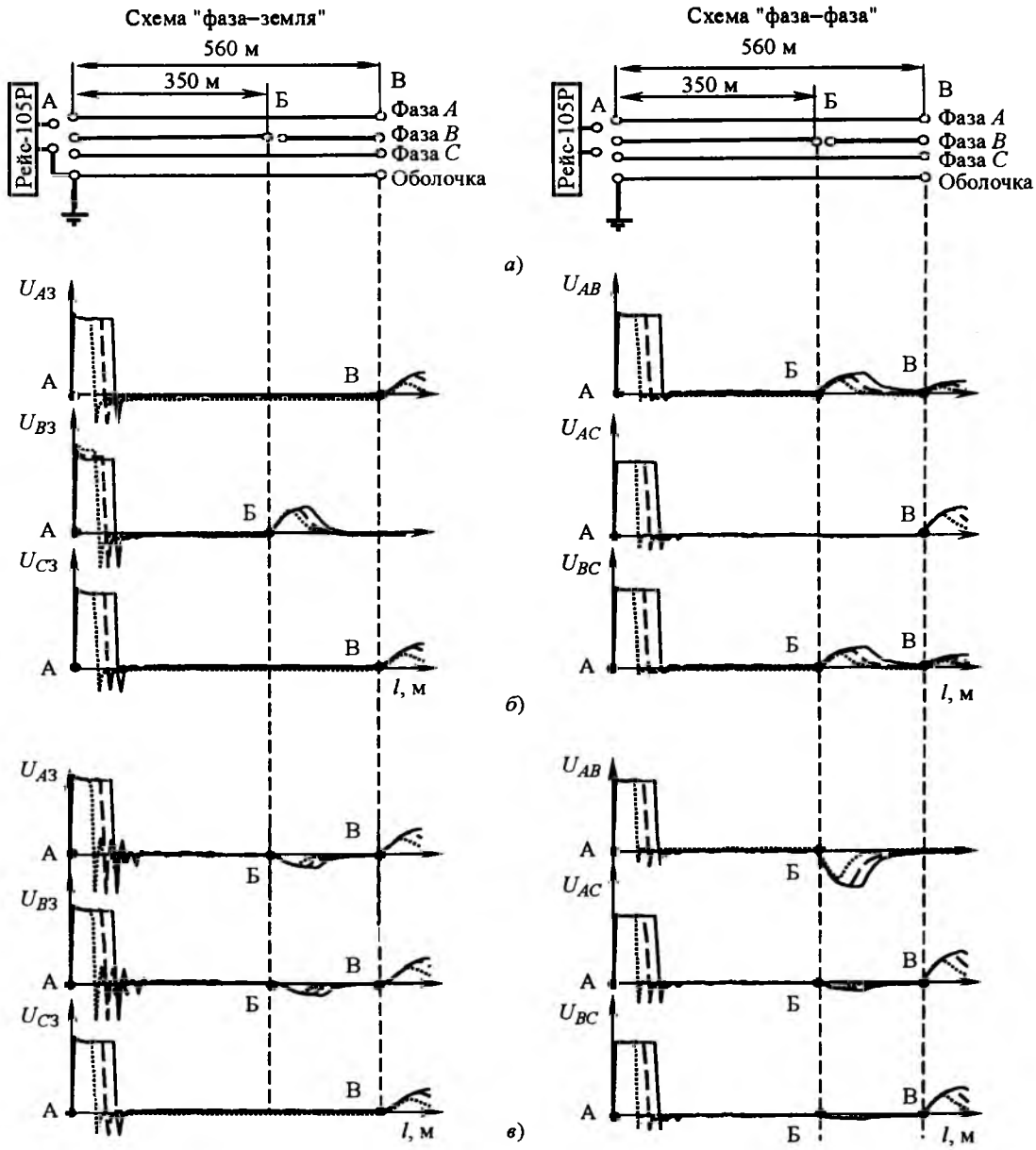


Рис.1. Идентификация результатов прожига подземного кабеля при различных длительностях зондирующего импульса τ = 0,5 (••••); 0,75 (– – –); 1,0 мкс (—):
а – подключение рефлектометра к проводам линии по схемам "фаза–земля" (левая колонка) и "фаза–фаза" (правая колонка); *б* – рефлектограммы, снятые до прожига кабеля; *в* – после прожига кабеля; *D* – диапазон измерений; *K* – коэффициент укорочения (обрыв на проводе фазы *B* в т. *Б*, после прожига замыкание проводов фаз *A* и *B* на оболочку кабеля и между собой, т. *B* – разомкнутый конец линии)

Кроме того, в т. *B* на расстоянии 560 м присутствуют положительные импульсы с уменьшенной амплитудой, соответствующие разомкнутым концам фазных проводов кабеля. Таким образом, обрыв одного провода (фаза *B*) двухпроводных линий (из фазных проводов *A* и *B*, а также *B* и *C*) не препятствует дальнейшему прохождению зондирующего импульса по линии.

Целью прожига кабеля является создание КЗ в месте повреждения проводов. Прожиг (точнее говоря, пробой изоляции) осуществляется между повреждённой жилой и металлической оболочкой кабеля или другой жилой.

На рефлектограмме $U_{B3}(l)$ (рис.1,*в*) на проводе фазы *B* в т. *Б* на расстоянии 350 м вместо положительного импульса, обозначающего обрыв провода, после прожига появился отрицательный импульс, соответствующий КЗ между проводом фазы *B* и оболочкой кабеля. Одновременно на таком же расстоянии

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

в т. *Б* появился отрицательный импульс на рефлектограмме $U_{A3}(l)$, т.е. прожёгся провод фазы *А* и создалось КЗ между этим проводом и оболочкой. Таким образом провода фаз *А* и *В* оказались закороченными расплавом металла в процессе прожига с оболочкой кабеля и, следовательно, между собой.

Это подтверждается при зондировании по схеме "фаза–фаза" появлением отрицательного импульса большой амплитуды в т. *Б* на расстоянии 350 м на рефлектограмме $U_{AB}(l)$. Благодаря КЗ проводов фаз *А* и *В* в т. *Б* импульс по кабелю дальше не проходит, поэтому на рефлектограмме $U_{AB}(l)$ нет импульса, отражающегося от конца линии. На рефлектограммах $U_{AC}(l)$ и $U_{BC}(l)$ в т. *Б* наблюдаются отрицательные импульсы меньшей амплитуды, так как провод фазы *С* в результате прожига не повредился и КЗ не возникло. Но в т. *Б* появилась неоднородность волнового сопротивления со значением, меньшим паспортного волнового сопротивления между жилами кабеля до прожига, которое и породило отражённые импульсы с отрицательной амплитудой (подробнее о распознавании рефлектограмм импульсного локационного зондирования в [6–15]).

Импульсы, присутствующие в т. *Б* на рефлектограммах $U_{AC}(l)$ и $U_{BC}(l)$, имеют отрицательную полярность, что характерно для неоднородностей с сопротивлениями, меньшими волнового сопротивления кабеля. При этом импульс, отражающийся от возникшей неоднородности в т. *Б*, на рефлектограмме $U_{AC}(l)$ имеет несколько большую амплитуду по абсолютному значению, чем на $U_{BC}(l)$. Это свидетельствует о том, что сопротивление образовавшейся неоднородности на линии из проводов фаз *А* и *С* меньше сопротивления неоднородности линии из проводов фаз *В* и *С*. Отсутствие полного КЗ т. *Б* проводов фаз *А* и *В* с проводом фазы *С* подтверждается наличием на рефлектограммах $U_{AC}(l)$ и $U_{BC}(l)$ в т. *В* импульса положительной полярности, отражённого от разомкнутого конца кабельной линии.

Таким образом, рефлектограммы, снятые по схемам "фаза–земля (оболочка)" и "фаза–фаза", дают полное представление о состоянии жил кабеля до и после его прожига высоковольтным напряжением.

На практике встречаются случаи, когда не удаётся в процессе первого прожига получить достаточно малое сопротивление в месте повреждения кабеля, достаточное для применения индукционных или акустических методов. Тогда операция прожига повторяется до достижения желаемого результата.

На рис.2 представлены рефлектограммы, снятые при выполнении двухступенчатого прожига кабеля марки АСБ длиной около 430 м фидера, соединяющего ТП-816 и ТП-807 (D = 640 м, K = 1,87). Из рефлектограммы $U_{B3}(l)$ видно, что произошёл обрыв жилы фазы *В* на расстоянии 421 м от начала кабеля в т. *Б*, о чём свидетельствует наличие в этом месте положительного отражённого импульса. На рефлектограммах $U_{A3}(l)$ и $U_{C3}(l)$ на расстоянии 426 м в т. *В* видны положительные импульсы, соответствующие концам разомкнутых жил кабеля.

На рефлектограммах $U_{AB}(l)$ и $U_{BC}(l)$, снятых по схеме "фаза–фаза" (правая колонка на рис.2), присутствуют положительные импульсы в т. *Б*, обусловленные обрывом жилы фазы *В*. Так как жилы фаз *А* и *С* не повреждены, то на $U_{AC}(l)$ положительный импульс соответствует т. *В*, т.е. разомкнутому концу кабеля.

После первого прожига создалось замыкание на жилах фаз *В* и *С*, это видно по рефлектограммам $U_{B3}(l)$ и $U_{C3}(l)$, на которых в т. *Б'* появились отрицательные импульсы. Но импульс на $U_{B3}(l)$ меньше, чем на $U_{C3}(l)$, следовательно сопротивление КЗ на месте обрыва ещё велико (что подтвердилось измерениями с помощью омметра) для создания эффективной токовой петли с целью применения индукционных методов.

Рефлектограмма $U_{BC}(l)$ снята с участием двух жил с фазами *В* и *С*, которые в месте обрыва в результате прожига замкнуты на оболочку кабеля и имеют переходное сопротивление, которое меньше волнового сопротивления кабеля, поэтому в т. *Б'* виден отрицательный импульс с большой амплитудой. На рефлектограммах $U_{AB}(l)$ и $U_{AC}(l)$. в т. *Б'* видны положительные импульсы, так как переходные сопротивления цепей по жилам *А* и *В*, а также *А* и *С* через место прожига оказались больше волнового сопротивления кабеля.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

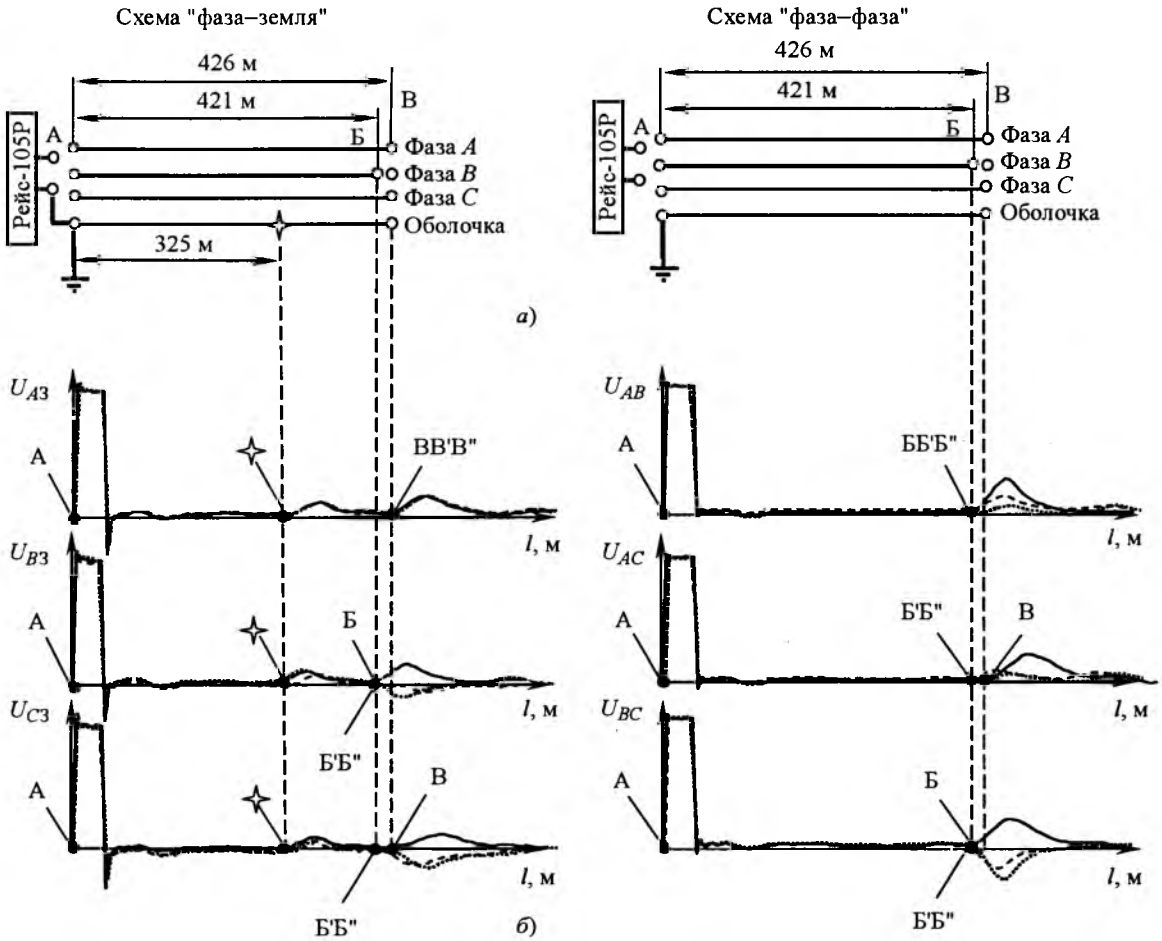


Рис.2. Идентификация результатов двухступенчатого прожига подземного кабеля:
а – подключение рефлектометра к проводам кабельной линии по схемам "фаза–земля" (левая колонка) и "фаза–фаза" (правая колонка); *б* – рефлектограммы, снятые до прожига (——), после первого прожига (– – –) и после второго прожига (·····) кабеля при длительности зондирующего импульса τ = 0,5 мкс (обрыв на проводе фазы *В* в т. *Б*, после первого прожига – замыкание проводов фаз *В* и *С* на оболочку кабеля и между собой, т. *В* – конец разомкнутой линии, ✧ – место повреждения оболочки кабеля)

После второго прожига переходное сопротивление на жиле *В* в месте обрыва в т. *Б"* уменьшилось, так как амплитуда отрицательного импульса в этой точке на рефлектограмме $U_{B3}(l)$ увеличилась. Амплитуда отрицательного импульса на $U_{C3}(l)$ в т. *Б"* не изменилась, следовательно, при повторном прожиге переходное сопротивление жилы *С* в этом месте осталось прежним. По этой же причине не изменилась амплитуда положительного импульса (точечная линия) в т. *Б"* на рефлектограмме $U_{AC}(l)$. Поскольку сопротивление на жиле *В* в месте обрыва понизилось и стало ближе к волновому сопротивлению кабеля, то положительный импульс в т. *Б"* на рефлектограмме $U_{AB}(l)$ уменьшился по амплитуде. Дополнительное понижение переходного сопротивления на жиле *В*, которое было меньше волнового сопротивления кабеля, повлияло на увеличение амплитуды отрицательного импульса в т. *Б"* на рефлектограмме $U_{BC}(l)$.

Кроме того, на рефлектограммах левой колонки рис.2, снятых по схеме "фаза–оболочка", на расстоянии 326 м от начала линии видны дополнительные положительные импульсы, обозначенные звездочкой. На рефлектограммах правой колонки рис.2, снятых по схеме "фаза–фаза", эти импульсы отсутствуют. Можно сделать вывод, что эти импульсы обусловлены неоднородностью оболочки кабеля. Положительный импульс характеризует повышенное сопротивление (больше волнового сопротивления кабеля) в

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

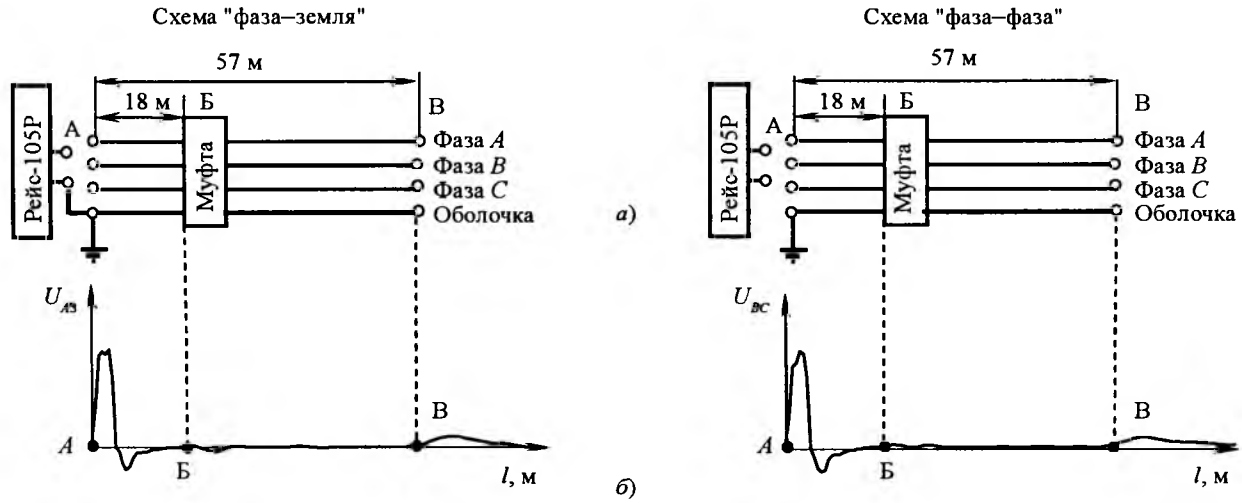


Рис.3. Обнаружение места нахождения муфты методом импульсного зондирования:
а – схемы подключения рефлектометра к кабельной линии; *б*, *в* – рефлектограммы при подключении по схемам "фаза – земля" (*б*); "фаза – фаза" (*в*), снятые при длительности зондирующего импульса τ = 0,05 мкс

месте повреждения. Это может быть повреждение оболочки кабеля или в этом месте может находиться плохо состыкованная кабельная муфта.

Определение местоположения кабельной муфты иллюстрируется рис.3 (фидер № 24 на ТП-РП65, кабель марки АБ-240 длиной около 60 м, линия отключена от трансформаторов, D = 80 м, τ = 0,05 мкс, K = 1,87). При подключении рефлектометра РЕЙС-105Р по схеме "фаза–земля" к началу линии (левая часть рис.3,*а*) на рефлектограмме $U_{AB}(l)$ (рис.3,*б*) хорошо идентифицируется конец линии в т. *В*, что подтверждается наличием отражённого от конца линии импульса положительной полярности, соответствующего режиму ХХ. На расстоянии 18 м от начала линии в т. *Б* виден импульс отрицательной полярности, соответствующий месту нахождения соединительной муфты, что совпадает с данными технической документации на эту линию.

При подключении рефлектометра по схеме "фаза–фаза" (правая часть рис.3,*а*) также в т. *В* на рефлектограмме $U_{AB}(l)$ (рис.3,*в*) наблюдается отражённый от конца линии импульс положительной полярности, соответствующий режиму ХХ. Место нахождения соединительной муфты также идентифицируется на расстоянии 18 м от начала линии в т. *Б*. Но импульс отрицательной полярности, отражённый от муфты, в этом случае имеет меньшую амплитуду, что затрудняет его обнаружение.

На основании анализа рис.3, можно сделать вывод, что место нахождения соединительной муфты на кабеле при измерении по схеме "фаза–земля" определяется более надёжно, чем при измерении по схеме "фаза–фаза".

Подключения рефлектометра к другим фазным проводам в других сочетаниях в данном эксперименте не рассматриваются, так как соответствующие им рефлектограммы по форме совпадают с рефлектограммами, изображёнными на рис.3.

Анализ приведённых рефлектограмм показывает, что локационное зондирование кабельной линии можно применять не только для определения зоны нахождения места его повреждения. Локационный метод даёт возможность осуществить полную однозначную диагностику состояния самого кабеля и жил кабеля до и после его прожига, позволяет как бы "заглянуть" внутрь кабеля.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Казанских электрических сетей и студентам Казанского государственного энергетического университета Латипову А.Г., Сухомяткину М.О., Березину И.А. за помощь при выполнении измерений.

Список литературы

1. **Шалыт Г.М.** Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982.

2. **Минуллин Р.Г.** Методы и аппаратура определения мест повреждений в электросетях. Казань: ИЦ "Энергопрогресс", 2002.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

3. **Шалыт Г.М.** Определение мест повреждения воздушных и кабельных линий электропередачи // Сб. статей. М.-Л.: Энергия, 1966. С. 26–47.

4. **Платонов В.В., Шалыт Г.М.** Испытание и прожигание изоляции силовых кабельных линий. М.: Энергия, 1975.

5. **Шалыт Г.М.** Определение мест повреждений линий электропередачи импульсным методом. М.: Энергия, 1968.

6. **Минуллин Р.Г., Закамский Е.В.** Определение мест повреждения в электрических сетях напряжением 6–35 кВ импульсным методом // Материалы докладов Российского национального симпозиума по энергетике. Казань: КГЭУ, 2001. Т.2. С. 62–64.

7. **Минуллин Р.Г., Закамский Е.В.** Обнаружение повреждений в электрических распределительных сетях локационным методом. Казань: ООО "ИЦ Энергопрогресс", 2004.

8. **Минуллин Р.Г., Закамский Е.В., Андреев В.В.** Исследования условий отражения импульсных сигналов в распределительных сетях с древовидной топологией // Электротехника. 2003. № 10. С. 39–44.

9. **Минуллин. Р. Г., Фардиев И.Ш.** Физические основы диагностики повреждений воздушных линий распределительных электрических сетей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2004. № 5–6. С. 43–47.

10. **Фардиев И.Ш., Минуллин Р.Г., Закамский Е.В., и др.** Диагностика воздушных линий распределительных электрических сетей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2004. № 7–8. С. 41–49.

11. **Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Губаев Д.Ф. и др.** Локационный мониторинг неоднородностей проводящих структур с древовидной топологией // Доклады XII Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация и связь RLNC". Воронеж: ВГУ, 2005. С. 1189–1200.

12. **Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Губаев Д.Ф., Карпенко О.И.** Построение системы корпоративной связи нового поколения по распределительным сетям напряжением 0,4–35 кВ // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2005. № 3–4. С. 21–41.

13. **Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Губаев Д.Ф. и др.** Использование распространения высокочастотных сигналов по проводящим структурам с древовидной топологией для диагностики их состояния // Доклады XXI Всероссийской научной конференции "Распространение радиоволн". Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. Т.2. С. 408–412.

14. **Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Губаев Д.Ф. и др.** Импульсные реакции неоднородностей распределительных электрических сетей при локационном зондировании // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XII Бенардосовские чтения). Иваново: Иванов. гос. энерг. ун-т, 2005. С. 179–180.

15. **Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш.** Построение электрических распределительных сетей нового поколения. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2005.

Минуллин Ренат Гизатуллович – профессор кафедры релейной защиты и автоматизации электроэнергетических систем (РЗАЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Окончил в 1959 г. радиотехнический факультет Казанского авиационного института. В 1989 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Прогностическая радиофизическая модель среднеширотного спорадического слоя Е" в ИЗМИРАН.

Фардиев Ильшат Шаехович – заведующий кафедрой РЗАЭС КГЭУ. Окончил в 1984 г. электроэнергетический факультет МЭИ.

Экспериментально-теоретический метод оценки способности разъединителей отключать ток холостого хода трансформаторов

ОСТРЕЙКО В.Н., АФАНАСЬЕВСКИЙ В.Е., КОЛМАКОВ А.В., МАЛКОВ А.С., ЯКОВЛЕВ Г.Н.

Получены формулы для теоретической оценки (расчёта) дугогасительной способности высоковольтных разъединителей отключать ток с действующим значением $I > I_o$, где I_o – ток, при котором выполнен соответствующий эксперимент.

One received the formulas for the theoretical estimation (calculation) of the high-voltage disconnector arc extinction ability to switch off the current with the effective value $I > I_o$, where I_o – the current, at which the corresponding experiment was carried out.

Высоковольтные разъединители и отделители должны отключать значительные токи XX трансформаторов, ненагруженных линий электропередачи и систем шин [1, с.256,

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

табл.9.1]. Однако из-за отсутствия в России соответствующих испытательных центров адекватные исследования могут быть выполнены лишь на действующих подстанциях. Естественно, что они не должны приводить к выходу из строя оборудования. Поэтому один из возможных методов решения данной проблемы – проведение испытаний на действующем оборудовании при заведомо безопасных (минимальных) значениях тока (реализуемых, например, с помощью реакторов) и последующее использование полученной экспериментальной информации в расчётных алгоритмах, позволяющих теоретически оценить дугогасительную способность разъединителей (отделителей) при требуемых существенно более высоких токах. Именно такой метод рассматривается в настоящей работе.

Длина электрической дуги. Ограничимся случаем горизонтально размыкаемых контактов. Покажем, что при этом общее уравнение для длины дуги $l_д(t)$ как функции времени t размыкания контакта имеет вид

$$l_д(t) \approx Kvt, \qquad (1)$$

где v – некоторая скорость; $K > 1$ – коэффициент увеличения длины дуги за счёт мелких петель и изгибов [2, с.92].

При размыкании контактирующих электродов *1* и *2* в направлении прямолинейной координаты x с постоянной скоростью v_x образуется воздушный промежуток длиной (рис.1)

$$l_x(t) = v_x t. \qquad (2)$$

Следовательно, в случае рис.1,*а* длина дуги

$$l_д(t) \approx Kl_x(t) = Kv_x t, \qquad (3)$$

в случае рис.1,*б*

$$l_д(t) \approx K\frac{\pi}{2}l_x(t) = K\frac{\pi}{2}v_x t, \qquad (4)$$

в соответствующем же [2, с.92, рис.4–3, *а*] случае рис.1, *в*

$$l_д(t) \approx K[l_x(t) + 2l_y(t)] = K(v_x + 2v_{ду})t, \qquad (5)$$

а в случае рис.1, *г*

$$l_д(t) \approx K \cdot 2l_{xy}(t) = K \cdot 2\sqrt{l_y^2(t) + l_x^2(t)/4} = = Kt\sqrt{v_x^2 + 4v_{ду}^2}, \quad l_y(t) = v_{ду}t, \qquad (6)$$

где $v_{ду}$ – скорость вертикального движения (подъёма) дуги вдоль прямолинейной координаты y.

Таким образом, согласно (3)–(6), входящая в (1) скорость v

$$v = \begin{cases} v_x, & \text{рис.1,}а; \\ \frac{\pi}{2}v_x, & \text{рис.1,}б; \\ v_x + 2v_{ду}, & \text{рис.1,}в; \\ \sqrt{v_x^2 + 4v_{ду}^2}, & \text{рис.1,}г. \end{cases} \qquad (7)$$

Отметим, что экспериментально определяемый геометрический характер дуги, а следовательно, и наиболее приемлемый вариант его аппроксимации (рис.1, *а*, *б*, *в* или *г*) за-

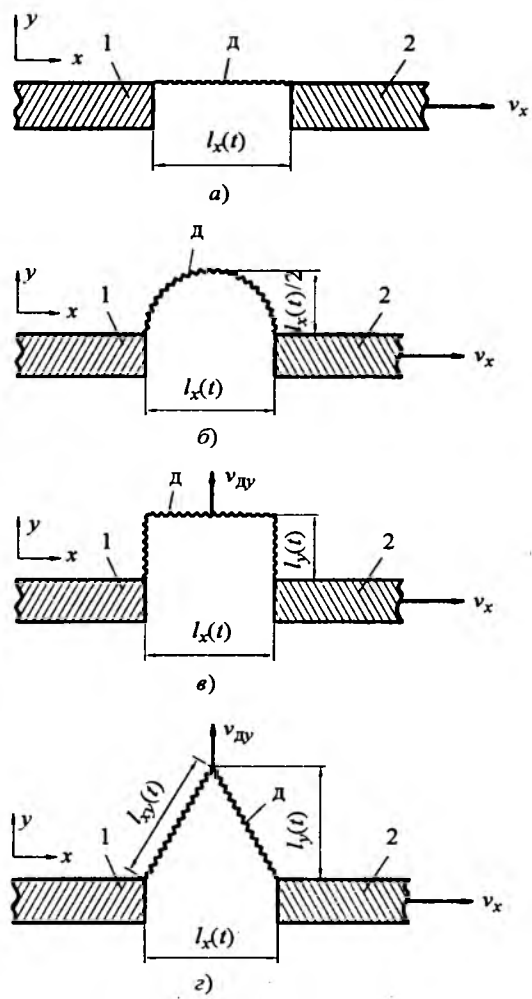


Рис.1. Варианты геометрической аппроксимации дуги между электродами *1* и *2* горизонтально размыкаемого вдоль оси x со скоростью v_x контакта: *а* – аппроксимация прямолинейным отрезком; *б* – полуокружностью; в – П-образной линией; *г* – Λ-образной линией

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

висит от конфигурации размыкаемых электродов, экранов и других конструктивных факторов контактной системы.

Активное сопротивление дуги. Процесс гашения дуги существенно зависит от её активного сопротивления $R_д$. Оно сложным образом зависит от времени t, тока и других факторов. Приемлемое выражение, описывающее $R_д = R_д(t)$, в литературе отсутствует. Для его вывода воспользуемся оценочной эмпирической формулой [2, с.94]

$$R_д(t) \approx \frac{l_д(t)}{I}, \qquad (8)$$

где $l_д(t)$ – длина дуги, мм; I – действующее значение тока до начала размыкания контакта, А.

Согласно (1) выражение (8) линейно зависит от времени t, что явно не соответствует действительности [2, с.94, рис.4-4]. Для приближения к этой действительности добавим к (8) существенно нелинейный член:

$$R_д(t) \approx \frac{l_д(t)}{I} + q\frac{l_д^{\beta}(t)}{I^{\alpha}}, \qquad (9)$$

где α, β и q – некоторые положительные коэффициенты, причём $\beta >> 1$, а поскольку тепловыделение в основном зависит от I^2, то можно считать, что $\alpha \approx 2$.

Анализ показывает, что наиболее простое математическое решение рассматриваемой задачи получается при $\beta = 3$. Так как по своей сути аппроксимация (9) является оценочной, а коэффициент q будет определяться на основе экспериментальной информации, то примем $\beta = 3$. В этом случае выражение (9) конкретизируется:

$$R_д(t) \approx \frac{l_д(t)}{I} + q\frac{l_д^3(t)}{I^2}, \qquad (10)$$

где пока не определён лишь коэффициент аппроксимации $q > 0$.

Значение коэффициента аппроксимации. При замкнутом контакте разъединителя в случае ХХ трансформатора (и тем более при дополнительном использовании реакторов) реактивное сопротивление цепи X практически является индуктивным X_L, т. е. $X \approx X_L$. При этом, как правило, активное сопротивление цепи $R << X_L$, так что закон Ома для действующих значений приложенного к цепи напряжения и тока в ней принимает вид

$$U = I\sqrt{R^2 + X^2} \approx I\sqrt{R^2 + X_L^2} \approx IX_L. \qquad (11)$$

В момент размыкания контакта ($t = 0$) появляется электрическая дуга и начинается весьма сложный переходный процесс для тока $i = i(t)$, $t \geq 0$. Пренебрегая реально возможными бросками тока i при некоторых значениях времени t, аппроксимируем этот процесс, считая что он является экспоненциально затухающим, т.е. ток i пропорционален $\exp(-t / \tau)$, где τ – некоторое усреднённое значение постоянной времени цепи. Такой процесс будет длиться не более 5τ, т. е. он заведомо затухнет за время

$$t_д = 5\tau, \qquad (12)$$

поскольку $\exp(-t_д / \tau) = \exp(-5) \approx 0{,}0067 << 1$.

Величина (12) является временем горения дуги, по истечении которого наступает практически полный разрыв цепи ($i \equiv 0$) , так что на этом разрыве (разомкнутом контакте) длиной $l_{хд}$ будет падать всё напряжение питания цепи.

Согласно выражениям (1) , (2) и (12)

$$l_{д.д} = l_д(t_д) \approx Kv \cdot 5\tau;\ l_{хд} = l_x(t_д) = v_x \cdot 5\tau \approx \frac{v_x}{Kv} l_{д.д}, \qquad (13)$$

где $l_{хд}$ – длина воздушного промежутка разомкнутого контакта в момент времени (12) угасания дуги; $l_{д.д}$ – соответствующая длина дуги, называемая критической [2, с.68, 91].

Среднему на интервале времени (12) значению τ соответствует и среднее значение сопротивления дуги

$$R_{д.д} = \frac{1}{t_д}\int_0^{t_д} R_д(t)dt = \frac{1}{l_{д.д}}\int_0^{l_{д.д}} R_д(t)dl_д(t), \qquad (14)$$

где $l_{д.д}$ определяется выражением (13).

Подставив в (14) выражение (10), после интегрирования имеем:

$$R_{д.д} = \frac{l_{д.д}}{2I} + q\frac{l_{д.д}^3}{4I^2}. \qquad (15)$$

Согласно первому уравнению (13)

$$\tau \approx \frac{l_{д.д}}{5Kv}. \qquad (16)$$

С другой стороны, с учётом (11) и (15) τ как постоянная времени $LR_{д.д}$-цепи определяется выражениями

$$\tau = \frac{L}{R_{д.д}} = \frac{X_L}{\omega R_{д.д}} \approx \frac{4UI}{\omega(2Il_{д.д} + ql_{д.д}^3)}, \qquad (17)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где L – суммарная индуктивность цепи; ω – угловая частота изменения во времени питающего напряжения.

Приравнивая (17) и (16), получаем:

$$ql_{д.д}^4 + 2Iql_{д.д}^2 - 20KUIv/\omega \approx 0. \qquad (18)$$

Пусть при некотором, например, достаточно малом значении $I = I_0$ опытным путём установлена длина $l_{хд0}$ воздушного промежутка разомкнутого контакта, при которой наблюдается угасание дуги. Соответственно этому случаю уравнение (18) принимает вид

$$ql_{д.д0}^4 + 2I_0l_{д.д0}^2 - 20KUI_0v/\omega \approx 0. \qquad (19)$$

где согласно второму соотношению (13)

$$l_{д.д0} \approx K\frac{v}{v_x}l_{хд0},$$

что позволяет из (19) найти коэффициент q:

$$q \approx 2I_0\left(\frac{v_x}{Kvl_{хд0}}\right)^2\left[10\frac{U}{\omega Kv}\left(\frac{v_x}{l_{хд0}}\right)^2 - 1\right] > 0, \qquad (20)$$

где длина, скорость, ток и напряжение имеют соответственно размерности: миллиметр, миллиметр в секунду, ампер и вольт.

Таким образом, эта формула определяет искомый коэффициент аппроксимации q через априори известные величины ω, U, v_x и экспериментально определяемую величину $l_{хд0}$ при действующем значении тока I_0, а также через оцениваемые в этом же эксперименте значения коэффициента K и соответствующей (7) скорости v. Что касается условия $q > 0$, то оно является условием применимости рассматриваемого метода.

Длина дугогасительного промежутка разомкнутого контакта. Теперь, когда известен коэффициент q, из биквадратного уравнения (17) с учётом второго соотношения (13) может быть найдена длина (мм)

$$l_{хд} \approx \frac{v_x}{Kv}\sqrt{-\frac{I}{q} + \sqrt{\left(\frac{I}{q}\right)^2 + \frac{20KUIv}{\omega q}}}, \qquad (21)$$

оценивающая согласно (12), (13) в момент угасания дуги

$$t_д = \frac{l_{хд}}{v_x} = 5\tau \qquad (22)$$

расстояние $l_{хд}$ между расходящимися со скоростью v_x контактами разъединителя при требуемом действующем значении тока $I > I_0$. Все же остальные величины в выражении (21) имеют те же значения, что и в формуле (20). Это свидетельствует о решении поставленной задачи.

Пример практического применения метода. В августе 2003 г. на подстанции 330 кВ "Витебская" РУП Витебскэнерго была осуществлена с помощью выпускаемого ЗЭТО разъединителя типа РПГ-330 коммутация тока ХХ трансформатора типа АТ-125 МВ·А с действующим значением I_0 = 1А. При этом входящие в формулу (20) другие априори известные величины:

ω = 314 рад/с; U = 330000 В; v_x = 188 мм/с. (23)

Фотографирование электрической дуги при размыкании контакта разъединителя с указанной скоростью v_x показало (рис.2), что её характер аналогичен характеру [2, с.95, рис.4–5, *б*], т. е. он наиболее соответствует рис.1, *г*. Были оценены и входящие в формулу (20) неизвестные величины:

$l_{хд0} \approx 470$ мм; $K \approx 1{,}5$; $v_{дv} \approx 180$ мм/с, (24)

где $v_{дv}$ определяет v согласно последнему выражению (7).

Подставляя (23), (24) в формулы (20) и (22), с учётом значения I_0 = 1А и замены в (22) обозначений $t_д$, $l_{хд}$ и τ соответственно току I_0 на $t_{д0}$, $l_{хд0}$ и τ_0, получаем:

$q \approx 1{,}52 \cdot 10^{-6}$ А/мм^2; $t_{д0} \approx 2{,}5$ с; $\tau_0 \approx 0{,}5$ с. (25)

Разъединитель РПГ-330 имеет предельное разрядное расстояние между полностью ра-

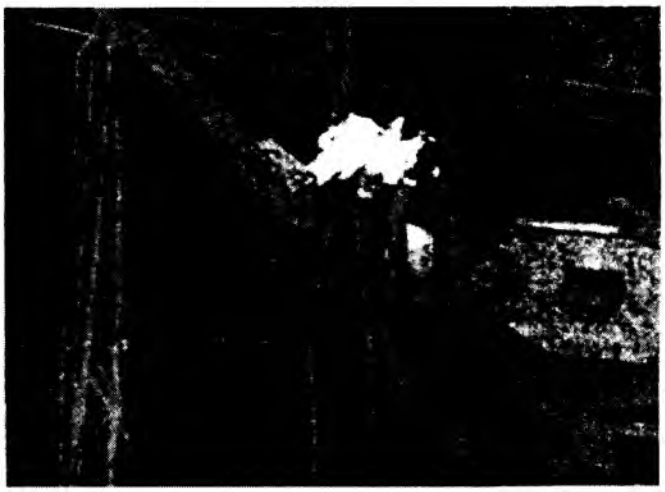


Рис.2. Электрическая дуга между размыкаемыми контактами разъединителя РПГ-330 при начальном действующем значении тока I_0 = 1А

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

зомкнутыми контактами l_{xm} = 2800 мм и согласно [1, с.256, табл.9.1] должен коммутировать ток с действующим значением I = 5А. При этом токе, согласно данным (23)–(25), из формул (21) и (221) находим:
$l_{хд} \approx 616$ мм; $t_д \approx 3{,}28$ с; $\tau \approx 0{,}656$ с, т. е. $l_{хд} << l_{xm}$. Следовательно, упомянутый разъединитель вполне способен коммутировать требуемый ток I = 5А.

Выводы

1. Разработан метод, позволяющий теоретически оценивать дугогасительную способность высоковольтных разъединителей при коммутации значительных токов ХХ трансформаторов. Метод предполагает наличие результатов соответствующих натурных испытаний при одном заведомо безопасном (т.е. сравнительно небольшом) значении тока.

2. Согласно натурным испытаниям выпускаемого ЗЭТО (г. Великие Луки) высоковольтного разъединителя типа РПГ-330 при действующем значении тока 1 А и расчётам по алгоритму разработанного метода этот разъединитель способен коммутировать требуемый ток [1, с.256, табл.9.1] с действующим значением 5 А.

Список литературы

1. **Сборник** директивных материалов главтехуправления Минэнерго СССР (Электротехническая часть). М.: Энергоатомиздат, 1985.

2. **Буткевич Г.В.** Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. М.: Энергия, 1973.

Острейко Владимир Николаевич – профессор кафедры электротехники и электромеханики Северо-Западного заочного технического университета (Санкт-Петербург), советник генерального директора завода электротехнического оборудования (ЗЭТО) по новой технике, канд. техн. наук. Окончил факультет автоматики и вычислительной техники Ленинградского электротехнического института им. В.И. Ульянова-Ленина в 1970 г. Защитил диссертацию "Теория и расчёт потенциальных плоскомеридианных полей электротехнических устройств с помощью конформных отображений" в 1974 г.

Афанасьевский Владимир Ефимович – генеральный конструктор ЗЭТО. Окончил факультет технологии машиностроения Северо-Западного заочного политехнического института (Ленинград) в 1977 г.

Колмаков Антон Владимирович – главный инженер ЗЭТО. Окончил факультет "Полупроводниковые материалы и приборы" Московского института стали и сплавов в 1994 г.

Малков Алексей Сергеевич – главный конструктор ЗЭТО. Окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина в 1990 г.

Яковлев Геннадий Васильевич – главный инженер РУП Витебскэнерго, канд. техн. наук. Окончил факультет "Электрические станции" Белорусского политехнического института в 1970 г. Защитил диссертацию "Электрические характеристики плоских контактных соединений разъединителей на переменном токе" в 2001 г.

Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов стран СНГ и зарубежных фирм!

Журнал "Электротехника" предоставляет свои страницы для

РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики

ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах

ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала.

Телефон редакции (495) 361-95-96

E-mail: electrotechnika@mtu-net.ru

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Артём Эмануилович Кравчик

1 марта 2006 г. ушёл из жизни научный руководитель ОАО "НИПТИЭМ", заслуженный конструктор России, доктор технических наук Артём Эмануилович Кравчик.

Свою трудовую деятельность Артём Эмануилович начал в 1944 г. электромонтером на Баранчинском электромеханическом заводе. В 1949 г. он поступил учиться в Свердловский горный институт. После окончания института с 1954 по 1957 гг. работал электромехаником шахты треста "Копейскуголь". С 1957 по 1966 гг. он работал на Баранчинском электромеханическом заводе и прошёл путь от инженера до заместителя главного конструктора предприятия. В 1965 г. он без отрыва от производства успешно подготовил и защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук.

В 1966 г. А.Э.Кравчик был избран по конкурсу начальником расчетно-теоретического сектора ВФ ВНИИЭМ (ныне ОАО "НИПТИЭМ"), а в 1968 г. был назначен главным конструктором института и проработал в этой должности до 1997 г. Работая в институте, он подготовил и в 1989 г. защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора технических наук. В 1997 г.

Артём Эмануилович поступил работать на Владимирский электромоторный завод и в 2002 г. был назначен научным руководителем ОАО "НИПТИЭМ".

А.Э. Кравчик стоял у истоков создания и становления института (ВНИПТИЭМ) и был одним из основателей научно-практической школы создателей асинхронных двигателей. Под его руководством и при непосредственном участии были разработаны во Владимире и внедрены на заводах Советского Союза единые серии асинхронных двигателей 4А (1973 г.), 4АМ (1982 г.), АИ (1987 г.), а также ряд специализированных серий для железнодорожного и водного транспорта, атомных станций и др. Последние годы работы в ОАО "ВЭМЗ" и ОАО "НИПТИЭМ" он занимался созданием асинхронных двигателей серий 5А, 6А и их многочисленных модификаций.

Артём Эмануилович активно участвовал в международном сотрудничестве специалистов стран-участниц "Интерэлектро". Он щедро делился своими знаниями, выступал с докладами, преподавал, занимался подготовкой соискателей учёных степеней кандидатов технических наук.

А.Э.Кравчик широко известен в нашей стране и за рубежом, как специалист в области проектирования и исследования асинхронных двигателей. Он автор более 100 научных работ, в том числе трёх книг и двадцати изобретений.

Талантливый учёный, конструктор, организатор он пользовался заслуженным уважением и авторитетом среди специалистов института, электромехаников России. За свою научную деятельность он был награждён орденом "Знак Почёта", пятью правительственными медалями и четырьмя медалями ВДНХ СССР (в том числе двумя золотыми).

Скромный, добрый, отзывчивый, талантливый человек, своим трудом он внёс вклад в развитие электромашиностроения России и навсегда останется в нашей памяти.

Руководство Концерна "Русэлпром",
группы компаний ВЭМЗ, НИПТИЭМ.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Подписку на журнал "Электротехника" можно оформить следующим образом:

1. Подписка на почте по Объединённому каталогу "Пресса России", индекс журнала 71111.

2. Редакционная подписка

Вырезать из журнала бланк и заполнить его, указав разборчиво:

– фамилию, имя, отчество получателя;
– почтовый индекс, подробный адрес для доставки корреспонденции;
– телефон для связи;
– количество заказываемых экземпляров журнала.

Стоимость 1 экземпляра журнала на 2-е полугодие 2006 г. с учётом пересылки по России – 430 р.

Оплатить подписку в любом отделении Сбербанка, используя заполненный бланк.

Копию квитанции об оплате желательно прислать в редакцию:

– по адресу 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12. Редакция журнала "Электротехника".

– по факсу (495) 361-95-96.

Информацию о подписке можно получить по телефону (495) 361-97-59 или по E-mail: elektrotechnika@mtu.ru.

Извещение

ЗАО "Фирма "ЗНАК"
получатель платежа

расчетный счет № 40702810238170100450

Сбербанк России Краснопресненское ОСБ № 1569/1664
(наименование банка,

к/с 30101810400000000225
другие банковские реквизиты)

БИК 044525225 ИНН 7721019667

фамилия, имя, адрес плательщика

Кассир

Подписка на №№7-12/2006 г.	цена	шт.	Сумма
Журнал "Электротехника"			

Плательщик

Квитанция

ЗАО "Фирма "ЗНАК"
получатель платежа

расчетный счет № 40702810238170100450

Сбербанк России Краснопресненское ОСБ № 1569/1664
(наименование банка,

к/с 30101810400000000225
другие банковские реквизиты)

БИК 044525225 ИНН 7721019667

фамилия, имя, адрес плательщика

Кассир

Подписка на №№7-12/2006 г.	цена	шт.	Сумма
Журнал "Электротехника"			

Плательщик

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Исаак Яковлевич Браславский

20 мая 2006 г. исполнилось 70 лет со дня рождения и 45 лет научно-педагогической деятельности в Уральском государственном техническом университете (УГТУ-УПИ) доктора технических наук, профессора, заслуженного работника высшей школы России, действительного члена РАЭН, заведующего кафедрой "Электропривод и автоматизация промышленных установок" УГТУ-УПИ.

Профессор И.Я. Браславский является крупным учёным в области автоматизированного электропривода. Он создал актуальную для теории и практики электромеханических систем научную школу асинхронного полупроводникового электропривода массового применения, хорошо известную в нашей стране и за рубежом. Его научная деятельность связана с созданием теории, разработкой и внедрением полупроводниковых регулируемых асинхронных электроприводов массового применения. Он одним из первых в отечественной практике разработал научные основы управляемости асинхронных электроприводов, регулируемых напряжением, что позволило создать самостоятельный класс электроприводов переменного тока с расширенными функциональными и техническими возможностями и удовлетворить технологические требования многих производственных механизмов.

В последнее время под руководством И. Я. Браславского успешно развивается актуальное научное направление, связанное с созданием энергосберегающих технологий на основе регулируемых асинхронных электроприводов. Результаты исследований, выполненных И.Я. Браславским и руководимым им научным коллективом, открывают широкие возможности по снижению энергопотребления при применении регулируемых асинхронных электроприводов. По материалам этих разработок в 2004 г. Издательским центром "Академия" (г. Москва) опубликовано учебное пособие "Энергосберегающий асинхронный электропривод" для студентов высших учебных заведений, написанное И.Я. Браславским в соавторстве с сотрудниками кафедры.

Различные модификации систем асинхронного электропривода, разработанных под руководством И.Я. Браславского, неоднократно экспонировались на всесоюзных и международных выставках и были отмечены дипломами и наградами. И.Я. Браславский награждён золотой, двумя серебряными и бронзовой медалями ВДНХ.

И.Я. Браславский плодотворно ведёт подготовку научных кадров, под его научным руководством защищено 18 кандидатских и одна докторская диссертация.

По итогам конкурса грантов, проводимого Государственным комитетом Российской Федерации по высшему образованию, проф. И.Я. Браславскому и руководимому им научному коллективу неоднократно присуждались гранты на проведение фундаментальных исследований в области электротехники и автоматики.

И.Я. Браславский является автором более 400 научных работ, в том числе 6 книг, 8 брошюр, 17 авторских свидетельств на изобретения, 39 статей и докладов, опубликованных за рубежом (Румыния, Польша, Англия, Китай, Украина, Чехия, Венгрия, Болгария, Италия, Германия, Финляндия, Греция, Бельгия, Хорватия, Латвия и др.). И.Я. Браславский читал лекции в Болгарии и Германии.

И.Я. Браславский является членом Научно-методической комиссии специальности 140406 "Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов" УМО по энергетическим и электротехническим специальностям и ряда диссертационных советов.

И.Я. Браславский ведёт большую и результативную работу по совершенствованию учебного процесса, подготовке инженерных и научно-педагогических кадров, развитию и модернизации материально-технической базы кафедры. Под его руководством обновлены лабораторные практикумы по основным курсам специальности с использованием современных полупроводниковых электроприводов и цифровых (микропроцессорных) систем управления. В учебный процесс внедрены новые технологии обучения с использованием персональных компьютеров. За время его руководства кафедрой выпущено более 1600 инженеров.

И.Я. Браславский много времени уделяет научно-организационной работе. Он является членом Совета ассоциации "Автоматизированный электропривод" и членом Ассоциации инженеров-электриков. В течение многих лет он входил в состав президиума правления Российского научно-технического общества энергетиков и электротехников, работал заместителем председателя Уральского отделения РАЭН, председателем Свердловского областного комитета по автоматизированному электроприводу.

Редакция и редколлегия журнала "Электротехника" поздравляют Исаака Яковлевича с юбилеем и желает ему здоровья и творческих успехов.

Все книги по электротехнике и радиотехнике. Библиотека www.booksite.ru

Индекс
71111

ISSN 0013-5860 Электротехника. 2006. № 6. 1—64.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru