

ISSN 0013-5860





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

№ 3 МАРТ 1999

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)
НИИ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ»
(г. ЗАПОРОЖЬЕ)

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

ИВАНОВ В.Н., ЧИБИРКИН В.В., МАКАРЕВИЧ Л.В., МЕЩЕРЯКОВ В.М., ЩЕРБАКОВ В.Г., КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета), ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛОВАЦКИЙ А.В., АНДРИЕНКО П.Д.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
КОЧЕТКОВ В.Д.

БЕЛКИН Г.С., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., ДОЛКАРТ В.М., КОПЫЛОВ И.П., ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У., МОСКАЛЕНКО В.В., РОЗАНОВ Ю.К., СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного редактора), ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б., УСОВ Н.Н., ФИНКЕЛЬ Э.Э., ФЛОРЕНЦЕВ С.Н., ХОТИН В.А.

Адрес редакции:

123242, Москва,
Зоологическая ул., 11, комн. 213

Факс/телефон: 254-11-52

СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ

Борцов Ю.А., Юрганов А.А., Приходько И.А., Кожевников В.А. Экспериментальное исследование нечеткого стабилизатора возбуждения синхронного генератора 1

Федотов А.И. Дискретный операторный метод расчета переходных процессов в электрических цепях с выпрямительной нагрузкой 5

Тарарыкин С.В., Тютиков В.В., Красильникъянц Е.В. Физическое моделирование упругих механических систем средствами цифрового следящего электропривода 11

Чиндяскин В.И., Нелюбов В.М., Филиппова Т.Б. Математическая модель части электроэнергетической системы 15

Сотников В.В. Метод расчета внешнего магнитного поля машины постоянного тока по магнитной нагрузке в станине 17

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Акимов Л.В., Колотило В.И. Синтез СПР скорости неустойчивого, под влиянием отрицательного вязкого трения, объекта методом полиномиальных уравнений 22

Акимов Л.В., Колотило В.И. Синтез наблюдателей состояния для статической СПР скорости неустойчивого, под влиянием отрицательного вязкого трения, объекта 32

Ещин Е.К. Расчеты электромеханических переходных процессов в системе электроснабжения горных машин 41

ИЗОЛЯЦИОННАЯ ТЕХНИКА

Куимов И.Е. Развитие производства конкурентоспособной электроизоляционной продукции 45

Украинский Ю.М., Пак В.М. Создание современных электроизоляционных материалов и систем изоляции для тяговых электродвигателей нового поколения электровозов 53

Мелещенко В.Н., Пак В.М. Опыт применения обмоточного провода со слюдосодержащей изоляцией 56

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Красиков Н.Н. К моделированию электрополевой активации воды 58

ХРОНИКА

Калошкин А.М. Информация 60

Выставочная программа Интерэлектро на 1999 г. 62

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Игорь Петрович Копылов 63

Виктор Петрович Ефименко 64

Экспериментальное исследование нечеткого стабилизатора возбуждения синхронного генератора

Ю.А.БОРЦОВ, А.А.ЮРГАНОВ, доктора техн.наук,
И.А.ПРИХОДЬКО, В.А.КОЖЕВНИКОВ, кандидаты техн.наук

Приведены результаты экспериментального исследования системы регулирования возбуждения синхронного генератора с нечетким системным стабилизатором на электродинамической модели энергосистем. Показаны преимущества нечеткого стабилизатора: расширение области устойчивости в режиме потребления реактивной мощности, повышение демпфирования электромеханических колебаний и уменьшение времени переходного процесса в режиме больших возмущений.

Успешное функционирование автоматического регулятора возбуждения сильного действия (АРВ—СД) синхронного генератора (СГ) при больших и малых возмущениях во всех схемно-режимных ситуациях связано с необходимостью перенастройки коэффициентов и с изменением структуры регулятора [1,2].

В связи с этим задаче построения грубого регулятора возбуждения посвящены многие научные исследования последних лет. В частности, большое внимание уделяется построению регулятора возбуждения с использованием нечетких алгоритмов [3—7]. Нечеткое управление основывается на понятии нечеткого множества, введенного Л.А.Заде [8]. В таком множестве для оценки состояния объекта используются не количественные, а качественные (лингвистические) значения переменных. Степень принадлежности элемента x множеству может быть любым числом единичного интервала $\mu_A(x) = [0,1]$, а не только одним из двух чисел $\{0,1\}$, как в случае обычного (четкого) множества. При этом $\mu_A(x)$ — функция принадлежности, обозначающая субъективную оценку переменной (x) нечеткому множеству A .

Целесообразность использования нечеткого подхода следует из рассмотрения особенностей нечеткого управления [9]. Основное его преимущество — возможность формирования большого числа правил управления в зависимости от сочетания значений входных переменных регулятора и, следовательно, от изменения режима работы и значения возмущений.

Структура автоматического регулятора возбуждения традиционно включает в себя

автоматический регулятор напряжения и системный стабилизатор [1,2]. Нечеткие принципы управления используются в [3] для построения автоматического регулятора напряжения, в [4,6] — системного стабилизатора. В [7] нечеткий регулятор выполняет функции автоматического регулятора напряжения и системного стабилизатора. В качестве входных используются типичные для линейной структуры регулятора переменные: в автоматическом регуляторе напряжения — отклонение и производная напряжения [3,7], в системном стабилизаторе — отклонение и производная частоты напряжения [6], отклонение скорости и ускорение ротора [4,5], отклонения активной мощности и частоты напряжения [6], отклонение и производная активной мощности [7]. Исследования выполнены на основе математического моделирования [5,6], с помощью лабораторных стендов [3,4], на электродинамической модели [7].

Предлагаемая работа посвящена вопросам построения нечеткого системного стабилизатора (НС) возбуждения синхронного генератора и оценки его эффективности по результатам испытаний на физической модели энергосистем [10], включавшей в себя (рис.1):

- модельный турбогенератор мощностью $P_n = 8$ кВт с параметрами $\cos\phi_n = 0,85$, $x_d = 2,4$, $x_d' = 0,26$, $T_{d0} = 9,3$ с, $T_j = 5,5$ с, оснащенный статическим тиристорным возбудителем и промышленным образцом регулятора возбуждения типа АРВ-СДП1;
- повышающий и понижающий трансформаторы;
- трехфазную модель двухцепной линии электропередачи.

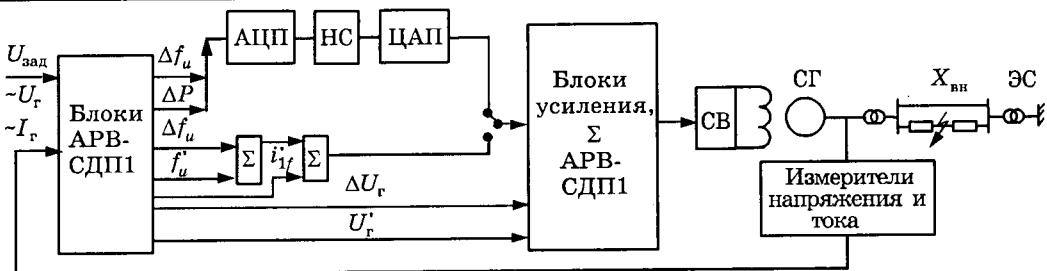


Рис.1. Функциональная схема системы управления возбуждением СГ

Это позволило максимально точно учесть такие трудно поддающиеся математическому моделированию факторы, как влияние массива ротора, насыщения стали генератора, емкости линии, динамические характеристики возбудителя и т.д.

Рассматривались два варианта системного стабилизатора:

— стандартный стабилизатор АРВ-СДП1, действующий по отклонению Δf_u и первой производной частоты напряжения генератора $\Delta f'_u$;

— НС, действующий по отклонению частоты напряжения Δf_u и отклонению активной мощности генератора ΔP от установившегося значения; при этом входные сигналы стабилизатора снимались с реальных измерительных блоков АРВ-СДП1 и через АЦП поступали в РС-386, реализующий нечеткий алгоритм управления; выход стабилизатора через ЦАП подавался на вход суммирующего усилителя АРВ-СДП1 вместо сигналов его штатного стабилизатора.

На функциональной схеме системы управления возбуждением (рис.1) дополнительно обозначено: СВ — система возбуждения, ЭС — энергосистема, $U_{\text{зад}}$ — напряжение задания.

Сравнительное преимущество выбранных стабилизирующих сигналов показали результаты предварительно выполненного математического моделирования системы управления возбуждением СГ с НС [6]*. Дополнительно отметим отсутствие в системе управления с НС обратной связи по производной тока возбуждения.

Максимальное значение напряжения возбуждения ограничивается значением $U_{f_{\text{max}}} = 2,33U_{f_u}$.

Настройки АРВ-СДП1 выбраны равными $k_{0u} = 25$ е.в.н./е.н., $k_{1u} = 3,75$ е.в.н./е.н./с,

$k_{1if} = 1,25$ е.в.н./е.т.в./с, $k_{0f} = 1,5$ е.в.н./Гц, $k_{1f} = 3$ е.в.н./Гц/с — коэффициенты усиления по отклонению и первой производной напряжения, первой производной тока возбуждения, по отклонению и первой производной частоты, соответственно (е.в.н. — единица возбуждения номинальная; е.н. — единица напряжения; е.т.в. — единица тока возбуждения).

Как правило, структура нечеткого регулятора содержит три элемента: фазификатор — блок преобразования четких входных переменных в их лингвистические значения, базу знаний (таблицу правил), дефазификатор — блок преобразования нечетких выходных переменных в четкие [9].

Преобразование четких входных переменных в нечеткие строго определяется с помощью функций принадлежности. Выбранные графики функций принадлежности входных переменных: отклонений частоты и мощности показаны на рис.2,а,б, соответственно. Элементы терм-множества лингвистических входных переменных включают семь значений: *OB*, *OC*, *OM* — отрицательные большое, среднее, малое, соответственно; *ПБ*, *ПС*, *ПМ* — положительные большое, среднее, малое, соответственно; *Н* — нулевое. Функция принадлежности выходного сигнала регулятора показана на рис.2,в. Максимальное отклонение частоты напряжения генератора, полученное во всех экспериментах, составляет 1,84 Гц, мощности — 0,872 о.е. Терм-множество выходного сигнала стабилизатора содержит 5 элементов.

База знаний построена на основе правила условного логического вывода вида [9]:

ЕСЛИ x_1 есть A_1 , x_2 есть A_2 и ... x_m есть A_m , ТО y есть B . В данном случае число членов в предпосылке $m = 2$, $x_1 = \Delta P$, $x_2 = \Delta f_u$, $y = u_c$ — выход стабилизатора, A_1, A_2, \dots, A_m , B — лингвистические значения переменных. Число правил равно 49. База знаний НС приведена в табл.1.

* В исследованиях использована программа построения нечеткого регулятора, разработанная на кафедре систем автоматического управления СПбГЭТУ канд.техн.наук П.В.Соколовым.

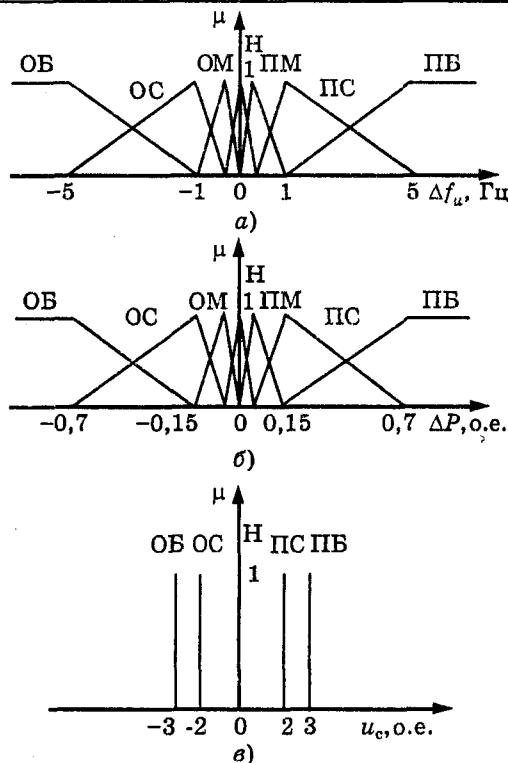


Рис.2. Графики функции принадлежности отклонения частоты напряжения (а), мощности (б) и выходного сигнала НС (в)

Управляющее воздействие с выхода стабилизатора определяется как средневзвешенное значение нечетких выходов B_{lc} использованием в качестве весов значений истинности правил μ_l .

В качестве нечеткой импликации использована операция взятия минимума.

$$u_c = \sum_{l=1}^4 B_{lc} \mu_l / \sum_{l=1}^4 \mu_l; \mu_l = \min(\mu_i, \mu_j), i = 1, 2; j = 1, 2; l = 1 \div 4.$$

На электродинамической модели экспериментально исследовались:

— эффективность демпфирования электромеханических колебаний при малых и больших возмущениях;

— статическая устойчивость в режимах потребления и выдачи реактивной мощности;

— динамическая устойчивость СГ при трехфазном коротком замыкании.

Таблица 1

$\Delta f_u, \Delta P$	ОВ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПВ
ПВ	0	ПС	ПС	ПС	ПС	ПВ	ПВ
ПС	ОС	0	ПС	ПС	ПС	ПВ	ПВ
ПМ	ОВ	ОС	0	ПС	ПС	ПС	ПВ
Н	ОВ	ОС	ОС	0	ОС	ПС	ПВ
ОМ	ОВ	ОС	ОС	ОС	0	ПС	ПВ
ОС	ОВ	ОВ	ОС	ОС	ОС	0	ПС
ОВ	ОВ	ОВ	ОС	ОС	ОС	ОС	0

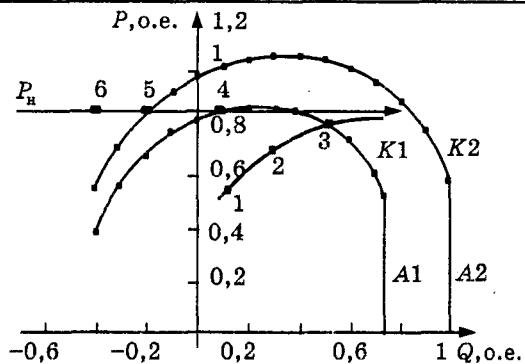


Рис.3. Исследованные режимы (точки 1—6); границы колебательной (K_1, K_2) и апериодической (A_1, A_2) статической устойчивости

Эксперименты проводились в шести точках диаграммы рабочих режимов СГ (рис.3, табл.2).

Точки 1—3 лежат на кривой изменения активной мощности при постоянстве напряжения генератора ($U_g = 1$ о.е.) и эквивалентного напряжения приемной энергосистемы ($U_c = 1,12$ о.е.) в утяжеленных режимах при отключении одной цепи линии. При этом эквивалентное внешнее сопротивление $X_{bh1} = 1,335$ о.е.. Кривые K_1 и A_1 — полученные расчетным путем [2] границы колебательной и апериодической устойчивости.

Точки 4—6 соответствуют режимам номинальной нагрузки по активной мощности при работе через двухцепную линию ($X_{bh2} = 0,99$ о.е.) и номинальном напряжении генератора. Утяжеление режима в направлении увеличения потребления реактивной мощности производится за счет повышения напряжения на приемном конце электропрерадачи. Расчетные границы статической устойчивости представлены кривыми K_2 и A_2 .

Относительно большие значения X_{bh} выбраны для того, чтобы обеспечить возможность проверки эффективности стабилизатора в предельных по статической устойчивости режимах без перегрузки генератора по активной мощности.

Процесс стабилизации оценивался, исходя из интегрального показателя качества в виде

$$J = \int_0^t \Delta P^2 dt, \quad t = 1,5 \text{ с.}$$

Из приведенных данных видно, что НС во всех режимах выдачи реактивной мощности демпфирует малые колебания не хуже аналогового АРВ с постоянной настройкой. Оба стабилизатора обеспечивают одинаковый предел статической устойчивости, совпадающий с расчетным пределом колебательной

Таблица 2

Внешнее сопротивление, о.е.	Активная мощность, о.е.	Реактивная мощность, о.е.	Напряжение сети, о.е.	№ режима	Критерий качества	
					Системный стабилизатор АРВ-СДП1	Нечеткий стабилизатор
1,335	0,55	0,12	1,12	1	11213	10735
	0,70	0,30		2	14890	7624
	0,81	0,52		3	—	—
0,99	0,85	0,08	1,16	4	6646	6214
		-0,21	1,35	5	34600	9598
		-0,41	1,49	6	—	14407

устойчивости (точка 3 с координатами $P = 0,81$ о.е., $Q = 0,52$ о.е.). При этом реальный предел всего на 4% меньше идеально-го предела апериодической устойчивости

$$P_{\text{пр}} = U_g U_c / X_{\text{вн}} = 1 \cdot 1,12 / 1,335 = 0,84 \text{ о.е.}$$

В режимах потребления реактивной мощности НС обеспечивает лучшее качество и возможность устойчивой работы в более широком диапазоне режимов (точка 6). При понижающем ступенчатом возмущении для СГ с АРВ-СДП1 предел по статической устойчивости был достигнут при $P = 0,85$ о.е., $Q = -0,21$ о.е. Включение НС позволило расширить пределы до значений $P = 0,85$ о.е., $Q = -0,41$ о.е. Иллюстрирующие графики для этого режима показаны на рис.4,а,б для АРВ-СДП1 и системы управления с НС, соответственно.

Демпфирование электромеханических колебаний при трехфазном коротком замыкании длительностью 0,14 с в начале двух-

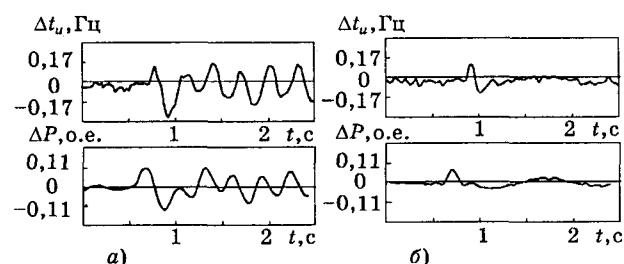


Рис.4. Демпфирование колебаний в режиме недовозбуждения $P = 0,846$ о.е., $Q = -0,21$ о.е.;
а — АРВ-СДП1; б — НС

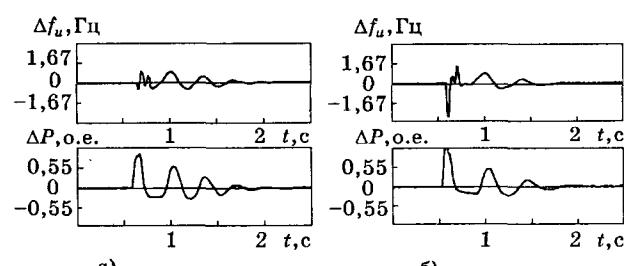


Рис.5. Демпфирование электромеханических колебаний при трехфазном коротком замыкании

цепной линии электропередачи при параметрах СГ $P = 0,846$ о.е., $Q = 0,058$ о.е. — отклонений частоты и мощности приведены на рис.5,а,б, соответственно. В случае работы НС время переходного процесса уменьшается с 1,5 до 1 с. Пределы динамической устойчивости в обоих случаях составили $P = 0,89$ о.е., критерий качества $J_a = 23878$, $J_b = 21955$.

Выводы

1. Использование НС позволило повысить демпфирование электромеханических колебаний и расширить область статической устойчивости в режиме недовозбуждения без изменения структуры и настроек стабилизатора.

2. Приведенные результаты, несмотря на необходимость дополнительной проработки вопросов настройки НС, целесообразности включения нечеткого автоматического регулятора напряжения, исследование работоспособности НС при асинхронном ходе, в режимах пуска, вопросов реализации НС и т.д., указывают на перспективность применения принципов нечеткого управления для регулирования СГ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта МЭИ № 97-25-3. 5-86.

Список литературы

1. Андерсон П., Фуд А. Управление энергосистемами и устойчивость. М.: Энергия, 1980.
2. Юрганов А.А., Кожевников В.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. С.-Пб: Наука, 1996.
3. Hasan A.R., Martis T.S., Sandrul Ula A.H.M. Design and implementation of a fuzzy controller based automatic voltage regulator for a synchronous generator// IEEE Transaction on energy conversion. September 1994. Vol.9, № 3. P.550—556.
4. Hiyama T. Robustness of fuzzy logic power system stabilizer applied to multimachine power system// IEEE Transaction on energy conversion, September 1994. Vol.9, № 3. P.451—459.

5. Chang H.-C., Wang M.-H. Neural network based self organizing fuzzy controller for transient stability of multi-machine power system//IEEE Transaction on energy conversion. June 1995. Vol.10, № 2. P.339–347.

6. The synchronous generator excitation stabilizer on the base of fuzzy algorithms principles/N.D.Polyakov, A.A.Yurganov, I.A.Prikhodko, P.V.Sokolov//First Int. (III All Rus.) conf. on electromechatronics (EMT'97) Proceedings, Saint-Peterburg May 14–16, 1997. St.—Petersburg: State Electrotechnical University. 1997. P.165–170.

7. Kitauchi Y., Taniuchi H. Experimental verification of fuzzy excitation control system for multi-machine power system//IEEE Transaction on energy conversion. March 1997. Vol.12, № 1. P.94—99.

8. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976.

9. Прикладные нечеткие системы/К.Асай, Д.Ватада, С.Иваи и др. М.: Мир, 1993.

10. Костенко М.П. Электродинамическая модель для исследования устойчивости//Электричество. 1950. № 9. С.5—16.

Борцов Юрий Анатольевич — профессор кафедры «Системы автоматического регулирования» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета. Окончил в 1951 г. факультет «Электрификация и автоматизация промышленности и транспорта» Московского энергетического института. В 1974 г. в Ленинградском электротехническом ин-

ституте защитил докторскую диссертацию по теме «Структурно-топологические методы исследования динамики промышленной системы электропривода».

Юрганов Алексей Анатольевич — заведующий лабораторией НИИэлектромаш. Окончил в 1962 г. электромеханический факультет Ленинградского политехнического института. В 1991 г. в Ленинградском политехническом институте защитил докторскую диссертацию по теме «Динамические свойства и устойчивость мощных турбогенераторов АЭС с сильным регулированием возбуждения».

Приходько Ирина Аркадьевна — докторант кафедры «Электромеханика и электромеханотроника» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета. Окончила в 1978 г. факультет «Электрификация и автоматизация» Ленинградского электротехнического института. В 1986 г. в Ленинградском электротехническом институте защитила кандидатскую диссертацию по теме «Разработка и исследование систем автоматического регулирования возбуждения криотурбогенератора».

Кожевников Владимир Александрович — старший научный сотрудник НИИэлектромаш. Окончил в 1972 г. электромеханический факультет Ленинградского политехнического института. В 1983 г. в Ленинградском политехническом институте защитил кандидатскую диссертацию по теме «Структура цифрового автоматического регулятора возбуждения мощных синхронных машин».

Дискретный операторный метод расчета переходных процессов в электрических цепях с выпрямительной нагрузкой

А.И.ФЕДОТОВ, доктор техн.наук

Разработаны методы локальных рядов и преобразования Фурье для описания электрических цепей с управляемыми преобразователями. Показана возможность формирования нелинейных математических моделей в численно-аналитическом виде. Обоснован способ их линеаризации.

Известно, что достоинством операторных методов является возможность выполнения алгебраических операций над изображениями вместо операций интегрирования и дифференцирования над оригиналами искомых переменных. Наряду с хорошо известными преобразованиями Лапласа и Фурье получили распространение и иные операторные преобразования, например, тейлоровские [1], предложенные Г.Е.Пуховым. Если преобразование Лапласа интегральное, то преобразование Тейлора дифференциальное. При выполнении численных расчетов в отличие от преобразования Лапласа оно может использоваться напрямую, особенно удобно вычислять свертки функций.

Другим направлением научной школы Г.Е.Пухова в развитии операторных методов была разработка методов локального интегрального преобразования, а также преобразований нетейлоровского вида, основанных на дискретизации непрерывных процессов и использовании рядов Ньютона и Лагранжа [1]. Они обеспечивают устойчивые численные расчеты нелинейных жестких дифференциальных уравнений. Возможно численное восстановление оригиналов функций, если известны их изображения по Лапласу, но этот алгоритм использует некоторые упрощающие допущения, что снижает его точность.

Обосновываемое в настоящей статье локальное преобразование Фурье можно рас-

сматривать как предложение исследований в области дискретных операторных методов. В отличие от изложенных в [1], оно предоставляет аналитические возможности при работе с дифференциальными уравнениями, а в приложении к описанию динамических процессов в электрических цепях с вентильными выпрямителями (и инверторами) позволяет формировать математические модели численно-аналитического вида. Их отличительной особенностью является переработка большей части информации в аналитическом виде и при этом включение в математическую модель одного или нескольких нелинейных численных коэффициентов относительно малого веса (в зависимости от схемы электрической цепи со стороны переменного или выпрямленного напряжения вентильного выпрямителя).

Предлагаемое преобразование отличается от дискретного преобразования Фурье и дискретного ряда Фурье, которые используются для изначально дискретных процессов, тогда как локальное преобразование Фурье, обеспечивая в конечном счете дискретную форму представления переменных, применяется к непрерывным процессам.

Поскольку локальное преобразование Фурье можно рассматривать как развитие комплексного исчисления [2] в области дискретизации непрерывных процессов, некоторые вопросы являются общими. Поэтому ограничимся только приведением основных формул, сосредоточив внимание на особенностях разрабатываемого метода в его приложении к электрическим цепям с выпрямительной нагрузкой.

Определим локальное преобразование Фурье или (F -преобразование) следующим образом:

$$F(m, k) = \frac{2}{h} \int_{t^{(m)}}^{t^{(m)}+h} f(t) e^{-jk(t-t^{(m)})} dt; \quad k = \frac{2\pi n}{h};$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

В отличие от [2] интервал h не увязывается с длительностью переходного процесса.

Формулу (1) можно представить в таком виде

$$F(m, k) = F^c(m, k) + jF^s(m, k);$$

$$F^c(m, k) = \frac{2}{h} \int_{t^{(m)}}^{t^{(m)}+h} f(t) \cos kt' dt;$$

$$F^s(m, k) = -\frac{2}{h} \int_{t^{(m)}}^{t^{(m)}+h} f(t) \sin kt' dt,$$

где $t' = t - t^{(m)}$.

$F(m, k)$ назовем комплексным локальным спектром функции $f(t)$. Локальный ряд Фурье $F_\Phi^{(m)}(t)$ функции $f(t)$ [3] легко связать с коэффициентами комплексного локального спектра:

$$f(t)^{(m)} = F_\Phi^{(m)}(t) =$$

$$= \frac{1}{2} F(m, 0) + \sum_{n=1}^{\infty} (F^c(m, k) \cos kt' - F^s(m, k) \sin kt'),$$

где $k = 2\pi n/h$; $t' \in (0; h)$.

На границах интервалов дискретизации, где периодизированная непериодическая функция претерпевает разрывы первого рода [3], справедливо соотношение

$$f(t^{(m)}) = F_\Phi^{(m)}(t^{(m)}) - \frac{1}{2} \Delta f^{(m)} = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(m, k) -$$

$$- \frac{1}{2} \Delta f^{(m)} = \frac{1}{2} F(m, 0) + \sum_{n=1}^{\infty} F^c(m, k) - \frac{1}{2} \Delta f^{(m)}, \quad (2)$$

где $\Delta f^{(m)} = f(t^{(m)} + h) - f(t^{(m)})$; $k = 2\pi n/h$.

Формула (2) позволяет связать дискретные параметры — отсчеты функции $f^{(m)}(t)$ — с непрерывными параметрами ряда Фурье через значения косинусных его коэффициентов $F^c(m, k)$. Очевидно, что практически ее использовать можно будет только в том случае, если удастся привести выражение (2) к уравнению в конечных разностях. Ниже будет показано, как это выполнить. Предварительно рассмотрим основные свойства F -преобразования.

Применим F -преобразование к производной непрерывной функции $f(t)$:

$$F\left\{ \frac{df(t)}{dt} \right\} = \frac{2}{h} \int_{t^{(m)}}^{t^{(m)}+h} \left(\frac{df(t)}{dt} \right) e^{-jkt'} dt =$$

$$= \frac{2}{h} f(t) e^{-jkt'} \Big|_{t^{(m)}}^{t^{(m)}+h} + jk \frac{2}{h} \int_{t^{(m)}}^{t^{(m)}+h} f(t) e^{-jkt'} dt =$$

$$= \frac{2}{h} \Delta f^{(m)} + jk F(m, k).$$

Пусть имеется система линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами в левой части

$$[a] \frac{d[x]}{dt} + [b][x] = [c], \quad (3)$$

где $[a]$ и $[b]$ — квадратные матрицы порядка $n \times n$; $[c]$ — матрица-столбец порядка n .

В общем случае элементы матрицы $[c]$ могут быть функциями параметра t . Применим F -преобразование к обеим частям уравнения (3).

Используя формулу (2), получаем:

$$([\mathbf{b}] + jk[\mathbf{a}][\mathbf{F}(m, k)] + (2/h)[\mathbf{a}][\Delta \mathbf{x}^{(m)}] = \mathbf{F}_c(m, k). \quad (4)$$

Если к уравнениям (4) применить преобразование Лапласа, то получим:

$$([\mathbf{b}] + p[\mathbf{a}][\mathbf{X}(p)] - [\mathbf{a}][\mathbf{x}(0)] = \mathbf{F}_c(p). \quad (5)$$

Сопоставляя выражения (4) и (5), находим, что структурно они идентичны. Если в уравнениях (5) сделать замены

$$p \leftrightarrow jk, [\mathbf{X}(p)] \leftrightarrow [\mathbf{F}(m, k)], [\mathbf{x}(0)] \leftrightarrow -(2/h)[\Delta \mathbf{x}^{(m)}], \quad (6)$$

то получим уравнения (4). Из этого структурного подобия преобразований следует важный вывод.

Для того, чтобы линейную систему дифференциальных уравнений вида (3) преобразовать к дискретам Фурье, достаточно воспользоваться результатами преобразования Лапласа, где следует осуществить подстановки вида (6). Поскольку по преобразованию Лапласа имеется обширная литература, то запись уравнений в области \mathbf{F} -изображений не вызовет затруднений. Соответственно и решение уравнений (4) будет иметь такой же вид, как и уравнений (5) (в операторных изображениях).

Следует учитывать, что в отличие от разложения функции в ряд Фурье, в данном случае восстановить непосредственно функцию по ее локальному спектру не представляется возможным, так как в правой части решения уравнений (4) будут присутствовать локальные разности, которые еще не определены. Поэтому необходимо выполнить суммирование всего локального спектра по формуле (2). Эта операция может быть выполнена и в численном виде, что составляет отдельное направление в области использования локальных рядов и локального преобразования Фурье для численного интегрирования дифференциальных уравнений. Однако при аналитических исследованиях целесообразно иметь возможность приведения выражений (2) к конечным разностям также в аналитическом виде, для чего следует продолжить изучение эквивалентного соотношения (6).

Решение уравнений (4) имеет следующий вид

$$[\mathbf{F}(m, k)] = \frac{1}{N(jk)} [\mathbf{M}(j, k)] \{ \mathbf{F}_c(m, k) + (2/h)[\mathbf{a}][\Delta \mathbf{x}^{(m)}] \},$$

где $N(jk)$ — многочлен относительно jk степени n .

Тогда

$$\begin{aligned} [\mathbf{F}^c(m, k)] &= \operatorname{Re}[\mathbf{F}(m, k)] = \frac{1}{N(jk)N(-jk)} \times \\ &\times \operatorname{Re}(N(-jk)[M(jk)]\{[\mathbf{F}_c(m, k)] + \frac{2}{h}[\mathbf{a}][\Delta \mathbf{x}^{(m)}]\}) = \\ &= \operatorname{Re}\{[\mathbf{D}_c(jk)] + [\mathbf{D}_d(jk)][\Delta \mathbf{x}^{(m)}]\}. \end{aligned} \quad (7)$$

В зависимости от вида \mathbf{F} -изображения матрицы $[\mathbf{c}]$ в уравнении (3) матрица $[\mathbf{D}_c(jk)]$ может составлять как конечную, так и бесконечную последовательность по k .

Выражение (2) можно трактовать как восстановление дискретного оригинала по его \mathbf{F} -изображениям, которые, в свою очередь, определяются, по выражению (7). Очевидно, что аналитические возможности рассматриваемого операторного метода могут проявиться только в том случае, если будет представлена возможность аналитического суммирования рядов $\sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{F}^c(m, k)$. Докажем, что для суммирования рядов правой части выражения (7) может быть получена формула, являющаяся определенным аналогом формулы обращения в преобразовании Лапласа.

Поскольку

$$\operatorname{Re}\{\mathbf{D}(jk)\} = \{\mathbf{D}(jk) + \mathbf{D}(-jk)\}/2,$$

можно просуммировать ряд вида $\sum \mathbf{D}(jk)/2$, изменив k в пределах от $-\infty$ до $+\infty$. Изображение по Лапласу $\mathbf{D}(p)$ представляет из себя отношение двух операторных выражений $\mathbf{D}(p) = M(p)/N(p)$.

В общем случае не обязательно, чтобы $M(p)$ и $N(p)$ были полиномами по p . Достаточно, чтобы вычеты комплексной функции $\mathbf{D}(p)$ определялись только корнями знаменателя $N(p)$. Для суммирования рядов вида $\sum_{-\infty}^{\infty} [M(jk)/N(jk)]$ воспользуемся методикой [4]. Рассмотрим функцию комплексного переменного вида $\phi(p) = j\pi\mathbf{D}(p)\operatorname{ctg} j\pi p$, которая в качестве полюсов имеет полюса $\mathbf{D}(p)$ (т.е. корни $N(p)$) a_1, a_2, \dots, a_I с вычетами b_1, b_2, \dots, b_I . Полюсами функции $\operatorname{ctg} j\pi p$ будут значения $0, \pm j, \pm 2j, \dots, \pm nj$. Для электрических цепей условие $\lim_{p \rightarrow \infty} p\mathbf{D}(p) = 0$ обычно выполняется. Поэтому на основании теоремы о вычетах [4] можем записать, что

$$\begin{aligned} \sum_{k=-\infty}^{\infty} D(jk) &= -j\pi(b_1 \operatorname{ctg} j\pi a_1 + \dots + b_I \operatorname{ctg} j\pi a_I) = \\ &= -j\pi \sum_{i=1}^{I-1} b_i \operatorname{ctg} j\pi a_i. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, для суммирования рядов F -изображений искомых переменных в соответствии с выражениями (2) и (7) необходимо определить полюса и соответствующие вычеты в их операторных изображениях по Лапласу, а далее воспользоваться формулой (8), которая может быть названа эквивалентом формулы обращения в операционном исчислении по Лапласу. Отличие заключается не только в замене временных экспонент на фиксированные их значения, но и в том, что при обращении изображений по Лапласу сразу находится функция во времени, а восстановление дискретной функции по (8) не позволяет непосредственно ее вычислить, поскольку согласно (2) итоговое выражение будет содержать еще и конечную разность.

Аналитический аспект F -преобразования проявляется при исследовании электрических цепей с преобразовательной нагрузкой. Рассмотрим трехфазный мостовой управляемый выпрямитель, работающий на активно-индуктивную нагрузку (рис.1). Его локальные уравнения в мгновенных значениях переменных имеют следующий вид [5]:

$$(2r_c + r_h) i_h^{(m)} + (2x_c + x_h) \frac{di_h^{(m)}}{d\theta} - k(\theta, m) \left(r_c i_\gamma^{(m)} + x_c \frac{di_\gamma^{(m)}}{d\theta} \right) = \sqrt{3} U \cos(\theta - m\pi/3), \quad (9)$$

где $k(\theta, m) = 1[\theta - \alpha - (m-1)\pi/3] - 1[\theta - \alpha - (m-1)\pi/3 - \gamma_m]$; $1[\theta]$ — единичная функция; $i_\gamma^{(m)}$ — коммутационный ток; γ_m — угол коммутации; α — угол управления, отсчитываемый от нулевого значения соответствующей фазной ЭДС.

Уравнения (9) после применения к ним F -преобразования на локальном интервале $[\alpha; \alpha + \pi/3]$ имеют следующий вид:

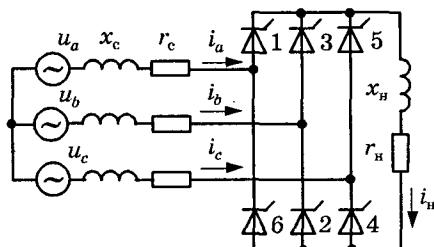


Рис.1. Трехфазный управляемый выпрямитель

$$(r_s + jkx_s) I_h(m, k) + \frac{6}{\pi} x_s \Delta I_h^{(m)} + \frac{6}{\pi} x_c I_{hl}^{(m)} - \frac{6}{\pi} (r_c + jkx_c) \int_{\alpha}^{\alpha + \gamma} i_\gamma^{(m)} e^{-jkt'} d\theta = -\frac{6\sqrt{3}}{\pi} U \frac{\cos(\alpha - \pi/6) + jk \sin(\alpha - \pi/6)}{(k^2 - 1)}.$$

Находим F -изображение тока выпрямительной нагрузки

$$I_h(m, k) = -\frac{6\sqrt{3}U}{\pi} \left(\frac{\cos(\alpha - \pi/6) + jk \sin(\alpha - \pi/6)}{(r_s + jkx_s)(k^2 - 1)} \right) - \frac{6}{\pi} \left(\frac{x_s \Delta I_h^{(m)} + x_c I_{hl}^{(m)}}{(r_s + jkx_s)} \right) + A(m, k), \quad (10)$$

где $A(m, k)$ — коэффициент, зависящий от принятой аппроксимации коммутационного тока $i_\gamma^{(m)}$.

Поскольку $k = 6n$, производим замену $jn \rightarrow p$. В результате для линейной составляющей тока в формуле (10) получаем:

$$I_h^l(p) = -\frac{6\sqrt{3}U}{\pi} \left(\frac{\cos(\alpha - \pi/6) + 6p \sin(\alpha - \pi/6)}{-(r_s + 6px_s)(36p^2 + 1)} \right) - \frac{6}{\pi} \left(\frac{x_s \Delta I_h^{(m)} + x_c I_{hl}^{(m)}}{r_s + 6px_s} \right). \quad (11)$$

Первое слагаемое выражения (11) имеет полюса $a_1 = -r_s/6x_s$, $a_2 = j/6$, $a_3 = -j/6$; для второго слагаемого $a = -r_s/6x_s$. В соответствии с формулами (2) и (8) и с учетом, что $z_s = \sqrt{r_s^2 + x_s^2}$, получаем:

$$I_{hl}^{(m)l} = -j\pi \frac{1}{2} \left\{ -\frac{6\sqrt{3}U}{\pi} \left[\frac{x_s \cos(\alpha - \pi/6) - r_s \sin(\alpha - \pi/6)}{6z_s^2} \times \operatorname{ctg} \left(j\pi \frac{-r_s}{6x_s} \right) + \frac{\cos(\alpha - \pi/6) + j \sin(\alpha - \pi/6)}{-12j(r_s + jx_s)} \operatorname{ctg} \left(j\pi \frac{j}{6} \right) + \frac{\cos(\alpha - \pi/6) - j \sin(\alpha - \pi/6)}{12j(r_s - jx_s)} \operatorname{ctg} \left(j\pi \frac{-j}{6} \right) \right] - \frac{6}{\pi} \left(\frac{x_s \Delta I_h^{(m)} + x_c I_{hl}^{(m)}}{6x_s} \right) \operatorname{ctg} \left(j\pi \frac{-r_s}{6x_s} \right) \right\}. \quad (12)$$

Поскольку при прямолинейной аппроксимации тока коммутации

$$\begin{aligned}\Delta I_{\text{hl}}^{(m)} &= \Delta I_{\text{hl}}^{(m)l} + \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A(m, k) - \frac{1}{2} \Delta I_{\text{h}}^{(m)} = \\ &= I_{\text{hl}}^{(m)l} + a_{\gamma} I_{\text{hl}}^{(m)} - \frac{1}{2} \Delta I_{\text{h}}^{(m)},\end{aligned}$$

после выполнения промежуточных преобразований над выражением (12) имеем следующее уравнение в конечных разностях:

$$\begin{aligned}\Delta I_{\text{h}}^{(m)} &= \sqrt{3} U \frac{\cos(\alpha - \psi) - \cos(\alpha - \psi - \pi/3) e^{-\pi r_s/3 x_s}}{z_s} - \\ &- \left[\frac{x_c}{2x_s} (1 + e^{-\pi r_s/3 x_s}) + (1 - a_{\gamma}) (1 - e^{-\pi r_s/3 x_s}) \right] I_{\text{hl}}^{(m)}; \\ \operatorname{tg} \psi &= x_s / r_s.\end{aligned}\quad (13)$$

При прямолинейной аппроксимации коммутационного тока коэффициент a_{γ} находится из выражений, полученных в [5, 6].

Уравнение (13), как и следовало ожидать, не отличается от аналогичного уравнения в [6], но получено оно путем выполнения более простых аналитических преобразований. Формально данное уравнение нелинейное в силу зависимости коэффициента a_{γ} от угла коммутации, который является в переходном процессе переменной величиной, зависящей от тока нагрузки. Однако в [6] на численных примерах показано, что этот коэффициент имеет относительно малый вес. На стадии переходного процесса его влияние несущественно, что предоставляет возможность линеаризации уравнения (13). Для этого достаточно определить a_{γ} в установившемся режиме.

Рассмотрим более сложный случай включения однофазного управляемого мостового преобразователя на активно-индуктивную нагрузку, имеющую магнитную связь с замкнутым контуром (рис.2). Такие преобразователи применяются в маломощных автономных синхронных генераторах с гармонической системой возбуждения, когда может быть использована двухполупериодная схема выпрямления.

Запишем локальные уравнения выпрямителя в мгновенных значениях переменных:

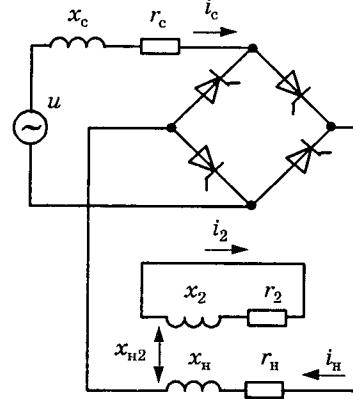


Рис.2. Однофазный двухполупериодный выпрямитель с магнитной связью на стороне выпрямленного тока

$$\left. \begin{aligned} u - r_c i_{\text{h}}^{(m)} - x_c \frac{di_{\text{h}}^{(m)}}{d\theta} + k(\theta, m) \left(r_{\text{c}} i_{\gamma}^{(m)} + x_c \frac{di_{\gamma}^{(m)}}{d\theta} \right) &= \\ = r_{\text{h}} i_{\text{h}}^{(m)} + x_{\text{h}} \frac{di_{\text{h}}^{(m)}}{d\theta} + x_{\text{h}2} \frac{di_2^{(m)}}{d\theta}; \\ x_{\text{h}2} \frac{di_{\text{h}}^{(m)}}{d\theta} + r_2 i_2^{(m)} + x_2 \frac{di_2^{(m)}}{d\theta} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где $u = \sin \theta$; $k(\theta, m) = 1[\theta - \alpha - (m-1)\pi] - 1[\theta - \alpha - (m-1)\pi - \gamma_m]$; $i_{\gamma}^{(m)} = i_{\text{h}}^{(m)} - i_{\text{c}}^{(m)}$; $i_{\text{c}}^{(m)}(\alpha) = -i_{\text{h}}^{(m)}(\alpha)$; $i_{\text{c}}^{(m)}(\alpha + \gamma_m) = i_{\text{h}}^{(m)}(\alpha + \gamma_m)$.

Применим к уравнениям (14) F-преобразование.

При прямолинейной аппроксимации тока коммутации

$$\begin{aligned} I_{\gamma}(m, k) &= \frac{4}{\pi} I_{\text{hl}}^{(m)} \left(\frac{1 - \cos k\gamma_m}{k^2 \gamma_m} + j \frac{\sin k\gamma_m - k}{k^2 \gamma_m} \right) = \\ &= \frac{4}{\pi} I_{\text{hl}}^{(m)} (a_{ik}^c + j a_{ik}^s), \end{aligned}$$

Для F-изображения напряжения

$$U(m, k) = - \frac{4U(\cos \alpha + j \sin \alpha)}{\pi(k^2 - 1)}.$$

В качестве варианта покажем, что не обязательно преобразовывать уравнения (14) к виду (7), а можно использовать их непосредственно, если ставится задача численного

Режим	a_{h} , Ом	$a_{\text{h}2}$, Ом	b_{h} , Ом	b_2 , Ом	$b_{\text{h}2}$, Ом	$b_{2\text{h}}$, Ом	E_{h} , В	E_2 , В
1	- 0,773	3,515	- 4,939	1,277	0,373	- 0,891	1,915	- 7,493
2	- 0,287	2,924	- 4,939	1,277	0,201	- 0,874	1,915	- 7,493
3	- 0,269	1,410	- 1,928	0,534	0,141	- 0,443	0,801	- 7,267
4	- 0,073	1,067	- 1,928	0,534	0,065	- 0,390	0,801	- 7,267

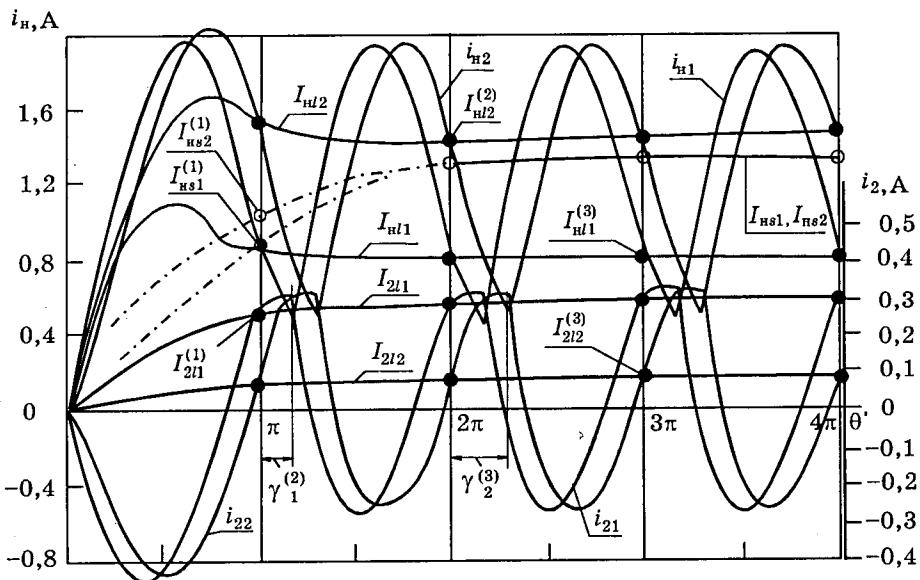


Рис.3. Расчетные токи в переходном процессе при $x_h/r_h = 1$ (дискретные значения токов $I_{hl}^{(m)}$ и $I_{2l}^{(m)}$ для наглядности соединены огибающими I_{hl} и I_{2l} , $i=1,2$; $m=1, 2, 3, 4$; $\theta' = \theta - \alpha$)

расчета без аналитического исследования конечной систем уравнений. Разделяя действительную и мнимую части, получаем следующую систему уравнений (14) после применения к ним F-преобразования:

$$\left. \begin{aligned}
 & (r_c + r_h)I_h^c(m, k) - k(x_c + x_h)I_h^s(m, k) - \\
 & - kx_{h2}I_2^s(m, k) = -\frac{4U \cos \alpha}{\pi(k^2 - 1)} - \frac{2}{\pi}(x_c + x_h)\Delta I_{hl}^{(m)} - \\
 & - \frac{2}{\pi}x_{h2}\Delta I_{21}^{(m)} - \frac{4}{\pi}(x_c - a_{ik}^c r_c + k a_{ik}^s x_c)I_{hl}^{(m)}; \\
 & - k(x_c + x_h)I_h^c(m, k) - (r_c + r_h)I_h^s(m, k) + \\
 & + kx_{h2}I_2^s(m, k) = k\frac{4U \sin \alpha}{\pi(k^2 - 1)} - \frac{4}{\pi}(k a_{ik}^c x_c + a_{ik}^s r_c); \\
 & - kx_{h2}I_h^s(m, k) + r_2I_2^c(m, k) - kx_2I_2^s(m, k) = \\
 & = -\frac{1}{\pi}x_{h2}\Delta I_{hl}^{(m)} - \frac{1}{\pi}x_2\Delta I_{2l}^{(m)}; \\
 & - kx_{h2}I_h^c(m, k) - kx_2I_2^c(m, k) - r_2I_2^s(m, k) = 0; \\
 & k = 2n; \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots
 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Решая уравнения (15) относительно $I_h^c(m, k)$ и $I_2^c(m, k)$ и выполняя суммирование по k в соответствии с формулой (2), приходим к системе разностных уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 & b_h\Delta I_{lh}^{(m)} + b_{h2}\Delta I_{l2}^{(m)} = E_h - a_h I_{lh}^{(m)}; \\
 & b_{h2}\Delta I_{lh}^{(m)} + b_2\Delta I_{l2}^{(m)} = E_2 - a_{h2}I_{lh}^{(m)} - a_2I_{l2}^{(m)}.
 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Для численного примера были приняты следующие исходные данные: $x_c = 3$ Ом; $x_2 = 2$ Ом; $x_h = 2$ Ом и $x_{h2} = 10$ Ом; $x_{h2} =$

$= 1$ Ом; $U = 10$ В; $r_c = 1$ Ом; $r_2 = 2$ Ом; $r_h = 2$ Ом. Повышенные значения активных сопротивлений, не характерные для возбуждительных систем, использованы специально для проверки достоверности математической модели по их учету.

Расчеты выполнены для четырех режимов при использовании в соответствующих коэффициентах установившегося значения угла коммутации на всем расчетном интервале:

1. $x_h = 2$ Ом; $\alpha = \pi/6$; $\gamma = 0,55$.
2. $x_h = 2$ Ом; $\alpha = 0,1$; $\gamma = 0,98$.
3. $x_h = 10$ Ом; $\alpha = \pi/6$; $\gamma = 0,78$.
4. $x_h = 10$ Ом; $\alpha = 0,1$; $\gamma = 1,21$.

В таблице приведены значения коэффициентов системы (16), рассчитанные с учетом 100 членов ряда. Коэффициент $a_2 = 2$ Ом во всех режимах. Все соответствующие коэффициенты рассчитывались при условии $\gamma = \gamma_{\text{уст}} = \text{const}$.

На рис.3 и 4 приведены расчетные мгновенные значения токов и нанесены значения дискретных токов. Определены также дискреты «полезной» составляющей выпрямленного тока $I_{hs}^{(m)}$ и для наглядности соединены непрерывными огибающими I_{hs} .

Как показывает анализ результатов, точность расчетов динамически режимов вполне удовлетворительная, несмотря на то, что для определения численных значений коэффициентов, зависящих от угла коммутации, использовано его установившееся значение.

Выводы

1. В отличие от известных операционных методов предложенное локальное преобразо-

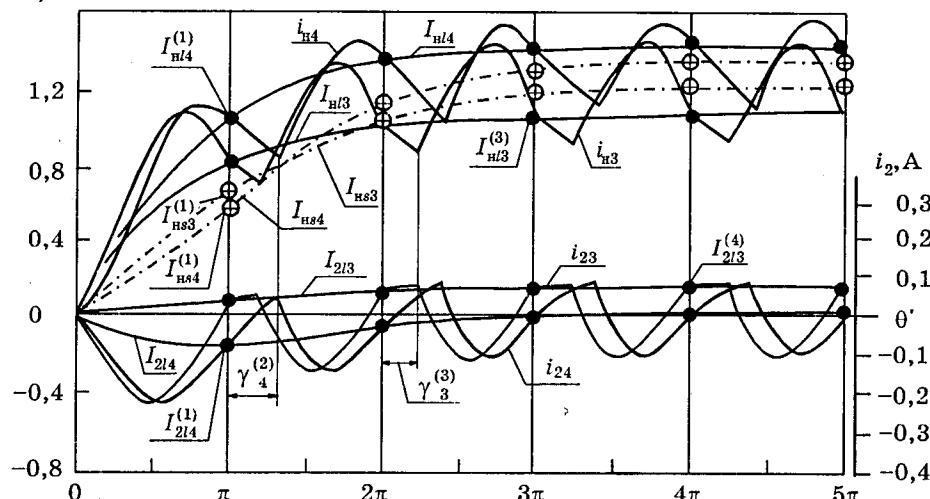
$i_{\text{h},A}$ 

Рис.4. Расчетные токи в переходном процессе при $x_{\text{h}}/r_{\text{h}} = 5$ (дискретные значения токов $I_{\text{hl}}^{(m)}$ и $I_{2l}^{(m)}$ для наглядности соединены огибающими I_{hl} и I_{2l} , $i=3,4$; $m=1,2,3,4,5$)

вание Фурье не обеспечивает возможности непосредственного нахождения оригинала, а осуществляет приведение дифференциальных уравнений к уравнениям в конечных разностях. В приложении к аналитическому описанию и численным расчетам электрических цепей с выпрямительной нагрузкой это позволяет формировать такие математические модели исходного нелинейного объекта, в которых нелинейный компонент локализован в ограниченном числе коэффициентов относительно малого веса. Данные коэффициенты могут вычисляться по параметрам установившегося режима, что обеспечивает линеаризацию дискретной модели.

2. Доказана возможность исследования переходных процессов с учетом длительности коммутации по уравнениям в конечных разностях в общем случае.

Список литературы

1. Береговенко Г.Я., Пухов Г.Е., Саух С.Е. Численные операторные методы решения дифференциальных

уравнений и анализа динамических систем. Киев: Наукова думка, 1993.

2. Пухов Г.Е. Комплексное исчисление и его применение. Киев: Наукова думка, 1961.

3. Кузнецов В.А., Федотов А.И. Применение локальных рядов Фурье для расчета электромагнитных переходных процессов в синхронных электрических машинах//Электротехника. 1997. № 4. С.34—37.

4. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1965.

5. Кузнецов В.А., Федотов А.И. Применение локального интегрального преобразования для исследования цепей с выпрямительной нагрузкой//Электротехника. 1997. № 7. С. 23—28.

6. Кузнецов В.А., Федотов А.И. Дискретное моделирование динамических режимов в электрических цепях с выпрямительной нагрузкой//Вестник МЭИ (ТУ). 1997. № 3. С.60—65.

Федотов Александр Иванович — доцент кафедры электроэнергетических систем и сетей Казанского филиала Московского энергетического института (технического университета). Окончил в 1975 г. электроэнергетический факультет Казанского филиала МЭИ. Защитил в МЭИ докторскую диссертацию «Дискретные методы анализа режимов синхронных электрических машин с вентильными системами возбуждения» в 1998 г.

Физическое моделирование упругих механических систем средствами цифрового следящего электропривода

С.В.ТАРАРЫКИН, доктор техн.наук, проф., В.В.ТЮТИКОВ, Е.В.КРАСИЛЬНИКЪЯНЦ, кандидаты техн.наук

Ивановский ГЭУ

Упругие многомассовые объекты являются наиболее характерными для механической части современного регулируемого электропривода (ЭП) и в значительной мере определяют степень сложности его управляющих устройств.

Они имеют сложное математическое описание, обусловленное высокой размерностью

дифференциальных уравнений, переменным характером нагрузок, наличием статических и динамических нелинейностей, обусловленных присутствием зазоров в кинематических передачах, а также вариациями параметров упругих связей и движущихся масс при возможных изменениях геометрии механических звеньев (роботы, манипуляторы,

антенные установки, прессовые машины технологических линий и т.п.).

Как правило, при синтезе систем автоматического управления электроприводами (САУ ЭП) такого рода объектов допускают значительное упрощение математического описания как электрической, так и механической частей: проводят линеаризацию звеньев, приведение схем к двухмассовым эквивалентам; «замораживают» значения варьируемых параметров, пренебрегают эффектами квантования сигналов и т.п.

Вследствие этого спроектированные САУ ЭП часто оказываются неспособными обеспечить расчетные показатели качества в реальных условиях эксплуатации и требуют выполнения дополнительных отладочных операций непосредственно на технологическом оборудовании.

Однако отладка регулируемого ЭП на объектах эксплуатации осложняется тем, что последние представляют собой, обычно, уникальное или дорогостоящее технологическое оборудование, проведение экспериментов на котором является крайне нежелательным.

Несмотря на значительные успехи в развитии средств вычислительной техники, создание детализированных цифровых моделей электромеханических систем (ЭМС) по-прежнему остается проблематичным из-за наличия в составе последних большого количества сложных звеньев (силовые преобразователи, импульсные и цифровые датчики, управляющие контроллеры и т.п.), мате-

матическое представление которых приводит к «жестким» системам уравнений, описывающих разнотемповые процессы. Кроме того, вычислительные эксперименты на моделях, безусловно, уступают по наглядности и информативности экспериментам с физическими моделями.

Выход исследователи находят в создании полунатурных комбинированных физических моделей, где быстрая электрическая часть и элементы управления ЭП обычно выбираются реальными, а механические звенья моделируются различными способами и средствами.

Использование для этих целей набора вращающихся масс, соединенных торсионными пружинами [1], позволяет применять реальные измерительные устройства для получения сигналов обратных связей с механической части, но оказывается неудобным из-за громоздкости установки и сложности реализации переменных нагрузок, моментов инерции и жесткости кинематических звеньев.

Применение аналоговых моделирующих средств, предложенное в [2], в определенной мере устраняет указанные недостатки, но не позволяет достичь высокой точности, стабильности параметров модели, имеет ограничение по функциональным возможностям и, как отмечают сами авторы, порождает новые проблемы, связанные с устойчивостью аналоговых контуров моделирования упругостей. Недостатком данного подхода является также отсутствие реальных измерите-

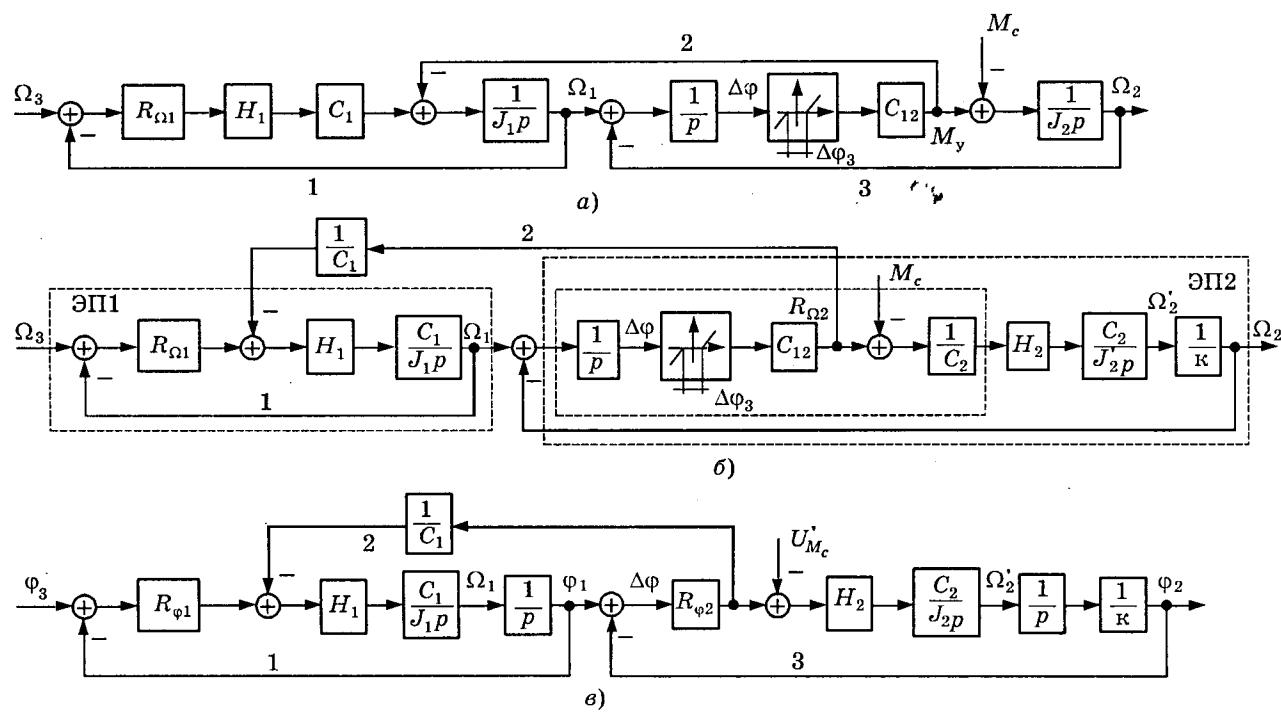


Рис.1.

лей переменных состояния механической части.

Предлагаемый в статье подход позволяет в значительной степени разрешить указанные проблемы на основе замены реальных механических элементов и связей их электрическими аналогами, реализуемыми средствами цифрового следящего электропривода (СЭП). Применение цифровых измерительных устройств и управляющих микропроцессорных контроллеров обеспечивает при этом возможность программной реализации сложных законов движения многомассовых упругих систем.

Переход от исходной механической системы к ее физической модели, удобной для дальнейшего использования, поясняется эквивалентными структурными преобразованиями, приведенными на рис.1. В целях простоты и наглядности пояснения даются на примере двухмассового механического объекта без демпфирования, однако аналогичные структурные преобразования и основанные на них приемы моделирования могут быть выполнены и для многомассовых упругодиссипативных систем.

Главная цель структурных преобразований состоит в обосновании возможности замены реальных механических звеньев элементами вспомогательного регулируемого электропривода, вращение ротора которого отражает движение главного рабочего органа, а силовые электрический и электромеханический преобразователи совместно с элементами управления обеспечивают динамические взаимосвязи вращающихся масс основного и вспомогательного электродвигателей (ЭД).

На рис.1,а приведена структурная схема исходной электромеханической системы, где Ω_3 , Ω_1 , Ω_2 — заданная величина и действительные значения угловых скоростей первой и второй масс; R_{Ω_1} , H_1 — передаточные функции регулятора скорости и оптимизированного контура тока; C_1 — конструктивная постоянная электродвигателя; J_1 , J_2 — моменты инерции ротора ЭД и рабочего органа; $\Delta\phi$ — разность угловых перемещений первой и второй масс; $\Delta\phi_3$, C_{12} — зазор и коэффициент жесткости упругой передачи; M_y , M_c — моменты упругости и приложенной нагрузки; 1, 2, 3 — номера замкнутых контуров; p — оператор дифференцирования. Все параметры механической части приведены к валу ЭД. Соблюдается условие малого влияния противо-ЭДС двигателя на работу САУ ЭП.

В основе предлагаемого подхода принято допущение о том, что динамические процессы в моделируемой механической части протекают существенно медленнее электромагнитных процессов в оптимизированных контурах регулирования токов основного и вспомогательного электроприводов. Это позволяет принять единичные значения коэффициентов передачи указанных контуров в структурных преобразованиях механической части. В большинстве упругих ЭМС это допущение соблюдается хорошо и не приводит к сколь-нибудь существенным ограничениям при моделировании, а его нарушение может свидетельствовать лишь о том, что для отладки данного электропривода целесообразнее использовать не упругий, а жесткий эквивалент его механической части.

Использование принятого допущения позволяет осуществить перенос сумматора через звенья с передаточными функциями C_1 и H_1 в контуре 1 так, как то показано на рис.1,б.

В итоге получаем структуру, все звенья и связи которой могут быть реализованы с помощью основного и вспомогательного электроприводов (ЭП1 и ЭП2), имеющих одинаковую мощность и одинаковый набор конструктивных элементов. При этом момент инерции J_2' и угловая скорость Ω_2' вспомогательного ЭД, имеющего конструктивную постоянную C_2 , будут в масштабах « k » и « $1/k$ » отражать значения момента инерции J_2 и угловой скорости Ω_2 реального рабочего органа: $J_2 = kJ_2'$, $\Omega_2 = \Omega_2'/k$. Такое масштабирование исключает необходимость изменения момента инерции ротора вспомогательного ЭД и может быть реализовано введением устройства измерения скорости с коэффициентом передачи $1/k$.

Функции сравнения сигналов Ω_1 и Ω_2 , интегрирования, нелинейного преобразования и масштабирования их разности коэффициентами C_{12} и $1/C_2$ в контуре 3 (рис.1,б), а также отражения влияния момента нагрузки M_c могут быть реализованы электронными средствами регулятора скорости R_{Ω_2} вспомогательного ЭП. Очевидно, что добавление к пропорциональной части C_{12}' этого регулятора дифференциальной составляющей \dot{v}_p позволит относительно легко учесть действие диссипативных сил (демпфирования) в механической передаче.

Перемещение интегратора, формирующего сигнал разности $\Delta\phi$ в контуре 3, против направления стрелок, согласно правилам эквивалентных структурных преобразований,

позволяет получить более удобный вариант схемы (рис.1,в), которая соответствует двухдвигательной ЭМС, состоящей из взаимосвязанных следящих ЭП, функционирующих в режиме отработки задаваемых угловых перемещений ϕ_3 и ϕ_1 . Передаточные функции регуляторов угла $R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$ получаются при этом введением последовательной дифференциальной составляющей в соответствующие передаточные функции $R_{\Omega 1}$, $R_{\Omega 2}$ регуляторов скорости.

Переход к управлению угловыми перемещениями φ_1 и φ_2 первой и второй масс снимает проблему ограничения скоростного диапазона физической модели, способствует повышению ее точности и упрощает техническую реализацию.

На рис.2 сплошными и штриховыми линиями показаны графики переходных процессов, полученные методом цифрового моделирования соответственно для исходной (рис.1,*a*) и преобразованной (рис.1,*б*) структур ЭМС в условиях одинаковых ступенчатых изменений сигналов задания скорости и момента нагрузки. В расчетах были приняты следующие передаточные функции и параметры звеньев: $R_{\Omega_1} = (1,9p+1)/0,1p$; $H_1 = 1/(0,007p+1)$; $C_1 = 0,7$ Вб; $J_1 = 0,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $\Delta\phi_3 = 0,2 \text{ рад}$; $C_{12} = 10 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$; $J_2 = 0,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $R_{\phi 2} = 10$; $R_{\phi 1} = 0,5p+30$ (с цифровой реализацией производной по методу Эйлера); $J_2' = 0,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $H_2 = 1/(0,007p+1)$. Приведенные результаты расчета иллюстрируют идентичность процессов в исходной и преобразованной моделях ЭМС и подтверждают справедливость выполненных структурных преобразований.

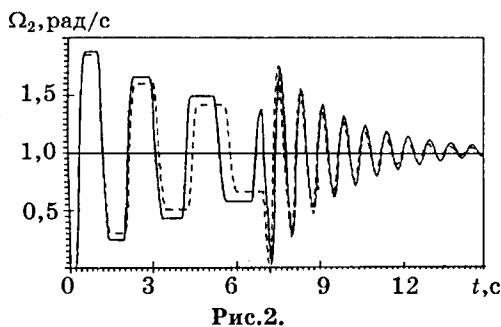


Рис.2.

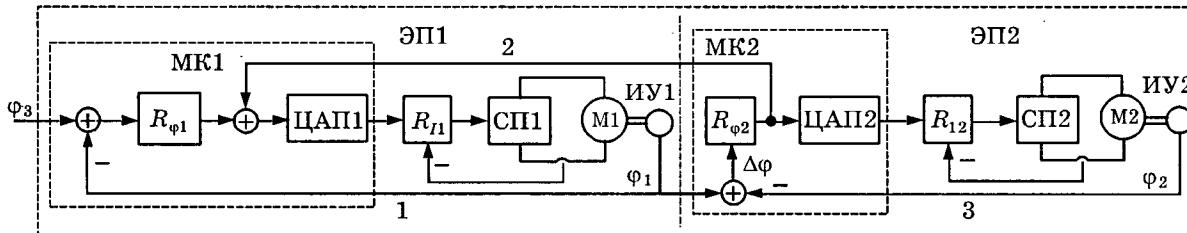


Рис.3.

На рис.3 приведена функциональная схема варианта физической модели упругой ЭМС, составленная в соответствии со структурой на рис.1,в. Она предполагает использование двух цифровых взаимосвязанных следящих ЭП1,2, силовая часть которых представлена электродвигателями $M1,2$ и преобразователями $СП1,2$, а информационно-управляющая часть строится на базе аналоговых регуляторов тока $R_{11,2}$ цифроаналоговых преобразователей $ЦАП1,2$, измерителей угловых перемещений $ИУ1,2$ и управляющих микроконтроллеров $МК1,2$, реализующих функции цифровых регуляторов угла $R_{\varphi1,2}$.

Техническая реализация ЭМС согласно рис.3 была выполнена на базе электродвигателей постоянного тока типа 2ПБ112, силовых преобразователей напряжения ЭТ-6 с аналоговыми ПИ-регуляторами тока, импульсных преобразователей угловых перемещений ВЕ-178А и микропроцессорных блоков динамической синхронизации «Синхродин» [3], построенных на базе однокристальных микроконтроллеров К1816ВЕ51.

Регистрирующим элементом стенда служил IBM совместимый компьютер, на который по последовательному интерфейсу поступала от *МК1,2* и отображалась на мониторе информация о ходе эксперимента (значения координат состояния системы). Характерные результаты моделирования в виде графиков переходных процессов ЭМС с различными параметрами упругих колебаний приведены на рис.4.

Следует отметить, что введенные в состав системы управляющие микроконтроллеры *МК1,2* могут быть использованы, при необходимости, для более полной компенсации влияния внутренней обратной связи по ЭДС двигателей. Однако результаты анализа детализированной структуры ЭМС и натурных экспериментов показывают, что влияние указанной связи на динамику системы оказывается идентичным воздействию сил вязкого трения в области первой и второй масс, имеющему место и в реальных механических системах.

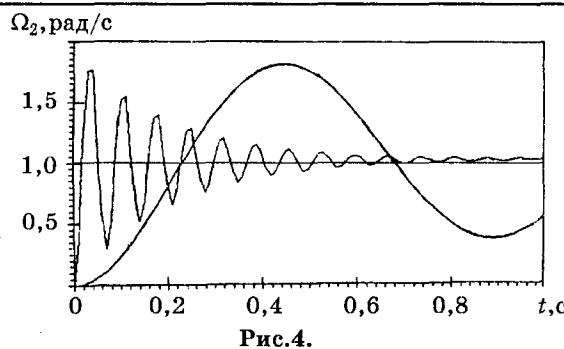


Рис.4.

Использование микропроцессорных контроллеров придает физической модели новые потенциальные возможности и при соответствующей доработке программных средств может обеспечить воспроизведение более сложных законов движения механических систем, например, зависимости моментов нагрузки и параметров звеньев от значений внутренних координат и др.

Следует отметить также, что применение разработанной модели позволяет осуществить отладку основного ЭП с использованием реальных измерительных устройств, которые будут устанавливаться впоследствии на технологических объектах.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанные методы построения и технические средства цифрового следящего ЭП позволяют существенно расширить возможности полунатурного физического моделирования сложных механических систем.

Список литературы

1. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Полунатурное моделирование систем управления электроприводами с упругостью/Г.Г.Соколовский, Л.А.Тудер, С.В.Копылов, Ю.А.Назаров//Электротехника. 1988. № 1.
3. Микропроцессорные синхронизирующие системы в машинах и агрегатах/С.В.Тараракин, Е.В.Красильникъянц, А.П.Бурков и др./Текстильная промышленность. 1994. № 4. С.24—26.

Тараракин Сергей Вячеславович — заведующий кафедрой «Электроника и микропроцессорные системы» Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ). В 1978 г. закончил электромеханический факультет ИГЭУ. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию на тему: «Принципы управляемой синхронизации машин в технологических агрегатах для производства ленточных и волоконных материалов».

Тютиков Владимир Валентинович — доцент кафедры «Электроника и микропроцессорные системы» ИГЭУ. В 1989 г. закончил электромеханический факультет ИГЭУ. В 1996 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Разработка и исследование систем координирующего управления взаимосвязанными электроприводами».

Красильникъянц Евгений Валерьевич — старший научный сотрудник кафедры «Электроника и микропроцессорные системы» ИГЭУ. В 1980 г. закончил электромеханический факультет ИГЭУ. В 1989 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Системы взаимосвязанного электропривода в агрегатах и машинах по производству нетканых материалов».

Математическая модель части электроэнергетической системы

В.И. ЧИНДЯСКИН, В.М. НЕЛЮБОВ, кандидаты техн. наук, Т.Б. ФИЛИППОВА

Оренбургский ГУ

Предложена математическая модель электроэнергетической системы, позволяющая прогнозировать режимы работы части электрической сети, на базе текущих параметров в граничных точках с сопредельными участками сети.

Для оперативного планирования режимов работы электроэнергетической системы (ЭЭС), диспетчерский персонал должен располагать прогнозом предполагаемых режимов в реальном масштабе времени. Информационной основой такого прогнозирования являются данные телеметрии и ретроспективная динамическая база данных оценок режимов, имевших место в процессе эксплуатации или рассчитанных на основе априорной информации, использование которой позволяет расчитать установившийся режим ЭЭС.

Практически это не всегда выполнимо, так как персонал конкретной энергосистемы не обладает информацией о текущем режиме сопредельных систем, а передаваемые предположительные цифры об ожидаемых потоках в узлах внешней энергосистемы нельзя считать достоверными. В этом случае требуется дополнительные математические расчеты перетоков мощности, прежде чем можно было бы использовать методы расчета установившегося режима ЭЭС.

Решение этой задачи начинается с диаг-

ностики достоверности телеизмерений, так как результат существенно зависит от качества используемых телеизмерений. Для анализа достоверности измерений используются уравнения баланса мощностей, которые позволяют не только установить достоверность телеизмерений, но и рассчитать значения неизмеренных параметров [1].

Для учета влияния внешних сетей при расчетах установившихся режимов части электрической сети предлагается представлять внешнюю сеть между точками соединения с интересующей нас подсистемой многополюсником.

На рис.1 представлен график многополюсника, описываемого системой уравнений в матричном виде:

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{U}, \quad (1)$$

где \mathbf{I} и \mathbf{U} — комплексные фазные напряжение и ток соответственно точек присоединения внешней сети, определяемые по данным ТИ или рассчитанные; \mathbf{Y} — коэффициенты, по которым определяются на текущий момент времени сопротивления внешней сети.

Матрица \mathbf{Y} — неизвестное. Определяем матрицу проводимости путем решения линейной системы уравнений порядка n^2 одним из известных методов, где n — число точек присоединения. На какой-то момент времени сопротивления схемы замещения (рис.2) эквивалента внешней сети можно определить по выражениям:

$$Z_{ij} = -\frac{1}{Y_{ij}}, \quad (2)$$

где $i = 1, n-1, j = i+1, n$;

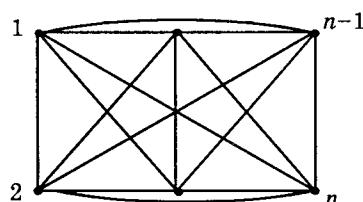


Рис.1.

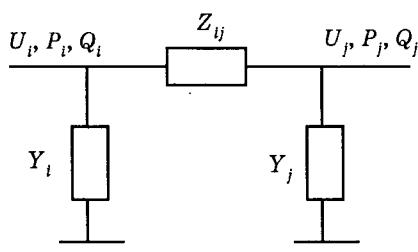


Рис.2.

$$\begin{cases} Y_1 = Y_{11}; \\ Y_i = Y_{ii} + \sum_{k=1}^{i-1} (Y_{ik} - Y_{ki}) \frac{U_k}{U_i}; \quad 2 \leq i \leq n. \end{cases} \quad (3)$$

После определения недостающих значений потоков мощности и напряжений в узлах происходит расчет режима, прогнозируемого на ближайший интервал времени, в том числе и для предполагаемых оперативных переключений.

Для расчета установившегося режима ЭЭС применяют один из известных методов расчета без учета частоты [3], так как в реальных условиях усложнение модели не повышает ее адекватности из-за отсутствия достаточно надежной информации о статических характеристиках нагрузок и генераторов по частоте.

Предложенный подход был опробован на модели четырехполюсника для электрических сетей напряжением 110—500 кВ ОАО «Оренбургэнерго». Результаты показали полную адекватность математической модели.

Выводы

1. Использование предложенной модели позволяет прогнозировать режимы части энергосистемы для произвольных оперативных переключений на основе телеизмерений в граничных точках сопредельных систем.

2. Данную модель можно применять также в случае наличия в системе так называемых ненаблюдаемых участков сети.

Список литературы

1. Титов А.П., Унароков А.А. Диагностика достоверности телеизмерений // Изв.вузов. Энергетика. 1989. №1.
2. Теоретические основы электротехники. Т.1. Основы теории линейных цепей/Под ред. П.А. Ионкина. М.: Высшая школа, 1976.
3. Методы решения задач реального времени в электроэнергетике/А.З. Гамм, С.И. Кучеров, Ю.И. Паламарчук и др. Новосибирск: Наука, 1991.

Чиндяскин Владимир Иванович — заведующий кафедрой ЭПП Оренбургского государственного университета (ОГУ). В 1981 г. закончил электротехнический факультет Оренбургского политехнического института (ОПИ). В 1985 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме: "Износстойкость скользящего контакта электрических машин с углеграфитовыми коллекторами".

Нелюбов Виктор Михайлович — доцент кафедры ЭПП ОГУ. В 1976 г. закончил электротехнический факультет ОПИ. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме: "Оптимизация параметров систем электроснабжения газоперерабатывающих предприятий".

Филиппова Татьяна Борисовна — младший научный сотрудник АНП "Технопарк ОГУ". В 1996 г. закончила электротехнический факультет ОГУ.

Метод расчета внешнего магнитного поля машины постоянного тока по магнитной нагрузке в станине

В.В.СОТНИКОВ, канд.техн.наук

Марийский ГТУ

Для решения задачи использована расчетная модель в виде цилиндрического тела с $\mu = \infty$. Границные условия учтены путем введения поверхностных токов. Получено выражение для основной пространственной сферической гармоники внешнего магнитного поля. Проанализировано влияние на это поле режима работы и несимметрии в конструкции.

Внешнее магнитное поле (ВМП) электрических машин может негативно воздействовать на чувствительные к магнитным полям оборудование и приборы [1]. Это необходимо учитывать при проектировании машин постоянного тока (МПТ), так как требования по электромагнитной совместимости в ряде случаев являются весьма жесткими. В связи с этим разработка методов расчета ВМП остается актуальной научной задачей.

Предположим, что МПТ имеет традиционную конструкцию. Станина и подшипниковые щиты выполнены из ферромагнитного материала; форма внешней поверхности — цилиндрическая. На рис.1,а изображена развертка статора такой машины. Предположим также, что в МПТ магнитопровод и обмотки имеют степень осевой симметрии, равную числу полюсов. Под степенью осевой симметрии магнитопровода (и обмоток) будем понимать такое число n , при котором поворот вокруг оси на угол $360^\circ/n$ переводит его в себя [2].

Для расчета ВМП машины можно использовать различные модели. Исходя из физических представлений, ВМП является алгебраической суммой полей обтекаемых током обмоток и различных намагниченных ферромагнитных узлов и деталей (сердечники якоря и полюсов, станина и т.п.). Однако их поля во внешнем пространстве в значительной степени взаимокомпенсируются и поле каждого может быть намного больше результирующего. Поэтому расчет ВМП по отдельным источникам нецелесообразен, так как неизбежные погрешности сильно отражаются на точности результата.

В [1] применительно к генератору переменного тока, по-видимому, впервые решена задача по определению ВМП электрической машины. По постановке она сходна с рассматриваемой в настоящей статье, так как

предполагается, что источником ВМП является сердечник статора генератора. При расчете он заменяется полым ферромагнитным шаром, с аналогичным размером внешнего и внутреннего радиуса. Максимальная индукция в шаре принимается равной ее значению в спинке. Полученное решение для скалярного магнитного потенциала имеет вид секториальной пространственной сферической гармоники (ПСГ), степень и порядок которой равны числу пар полюсов машины. Коэффициенты гармоники определены по граничным условиям на поверхности сердечника.

Недостаток использованной расчетной модели заключается в том, что ее геометрическая форма, удобная для решения краевой задачи, не соответствует цилиндрической форме машины. Поэтому полученное решение не позволяет выявить зависимость ВМП машины от длины ее сердечника.

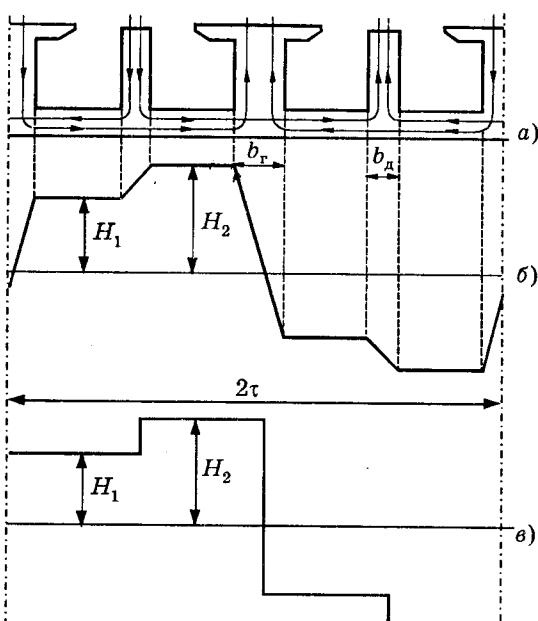


Рис.1. Развертка статора МПТ (а) и аппроксимация распределения напряженности магнитного поля в станине кусочно-линейной (б) и ступенчатой (в) функциями

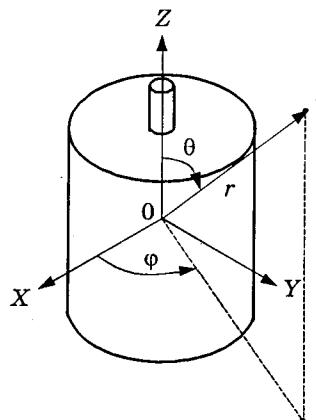


Рис.2. Система координат для описания ВМП МПТ

магнитное напряжение (разность магнитных потенциалов), что вызывает ответвление магнитного поля во внешнее пространство. Так как магнитный поток, создаваемый магнитодвижущими силами (МДС) различных обмоток МПТ, замыкается преимущественно по станине, то магнитное напряжение между точками ее поверхности на порядок и более превышает магнитное напряжение на поверхности подшипниковых щитов, через которые замыкаются, в основном, потоки рассеяния. С учетом этого для упрощения расчета можно принять, что ВМП МПТ образуется за счет ответвления части магнитного потока с поверхности станины.

Для решения задачи воспользуемся сферической системой координат r, θ, ϕ (рис.2), в которой угол θ отсчитывается от оси $0Z$, совпадающей с осью вала машины, а угол ϕ — от $0X$, направленной вдоль магнитной оси одного из главных полюсов.

Примем, что напряженность магнитного поля в станине имеет только азимутальную компоненту, которая не изменяется вдоль образующей ее внешней цилиндрической поверхности (при $\phi=\text{const}$). По окружности станины, принимая во внимание допущение о симметрии магнитопровода и обмоток, ее распределение имеет вид сложной периодической функции, которую, как удовлетворяющую условиям Дирихле, можно разложить в ряд Фурье. Использовав известное программное обеспечение ЭВМ, коэффициенты ряда можно легко получить в численном виде. Но с целью получения для них аналитического выражения аппроксимируем функцию ломаными линиями.

Заметим, что на участках станины между границами главных и добавочных полюсов

используемая в настоящей работе модель выбрана из следующих соображений. При замыкании магнитных потоков обмоток через элементы ферромагнитной оболочки МПТ между точками ее внешней поверхности вследствие конечного значения магнитной проницаемости материала создается определенное

напряженность магнитного поля различна, так как магнитные потоки полюсов на одних участках направлены встречно, а на других — согласно. Через добавочные полюсы и станину частично замыкается также и магнитный поток реакции якоря.

Примем напряженность магнитного поля на участках внешней цилиндрической поверхности в пределах ширины главных и добавочных полюсов изменяющейся по линейному закону, а между их границами — постоянной (рис.1,б). При этом в результате наложения магнитных потоков главных и добавочных полюсов напряженность между их границами на одних участках меньше и равна H_1 , а на других больше и равна H_2 . Значения H_1 и H_2 будем считать заданными. Они могут быть получены расчетным путем по известным методикам с учетом нелинейности магнитной цепи [3].

Кусочно-линейная аппроксимация по окружности станины функции распределения азимутальной компоненты $H(\phi)$ напряженности магнитного поля дает возможность получить достаточно простые формулы для коэффициентов ряда Фурье по координате ϕ . Ограничимся первой гармоникой этого ряда:

$$H(\phi) = H_d \sin p\phi + H_q \cos p\phi; \quad (1)$$

$$H_d = \frac{4\tau}{\pi^2 b_r} \left(2 \cos \frac{\pi b_r (H_2 - H_1)}{2\tau (H_2 + H_1)} - 1 \right) \times \\ \times (H_2 + H_1) \sin \frac{\pi b_r}{2\tau}; \quad (2)$$

$$H_q = \frac{4\tau}{\pi^2} \left(\frac{H_2 - H_1}{b_d} \sin \frac{\pi b_d}{2\tau} - \frac{2(H_2 + H_1)}{b_r} \times \right. \\ \left. \times \sin \frac{\pi b_r (H_2 - H_1)}{2\tau (H_2 + H_1)} \sin \frac{\pi b_r}{2\tau} \right), \quad (3)$$

где p — число пар полюсов; τ — полюсное деление; b_r , b_d — ширина (длина дуги), соответственно, главного и добавочного полюса; H_d , H_q — амплитуды первых (порядка p) пространственных гармоник ряда Фурье, соответственно, с синусным и косинусным распределениями напряженности поля.

Наличие синусного и косинусного членов в выражении (1) для первой пространственной гармоники напряженности поля обусловлено наложением в станине магнитных потоков главных и добавочных полюсов, сдвинутых по координате ϕ на $\pi/2p$.

Особенно простое выражение для H_d и H_q получается, если распределение по окружности станины азимутальной компоненты $H(\phi)$ напряженности магнитного поля аппроксимировать ступенчатой кривой, т.е. принять, что по оси главных и добавочных полюсов напряженность магнитного поля в станине изменяется скачком от H_1 до H_2 (рис.1,а). Это выражение как частный случай легко выводится из (2) и (3) путем предельного перехода при $b_r \rightarrow 0$ и $b_d \rightarrow 0$:

$$H_d = 2(H_2 + H_1)/\pi; \quad H_q = 2(H_2 - H_1)/\pi. \quad (4)$$

Математическое моделирование ВМП может быть выполнено на основе теории потенциала. Так как это поле безвихревое ($\text{rot} H = 0$), его напряженность H может быть представлена в виде градиента некоторой функции V — скалярного магнитного потенциала ($\text{rot grad} V \equiv 0$), удовлетворяющего уравнению Лапласа $\nabla^2 V = 0$ [4]:

$$H = -\text{grad} V. \quad (5)$$

Решение уравнения Лапласа для скалярного магнитного потенциала во внешней области в сферической системе координат имеет вид разложения в ряд по пространственным сферическим гармоникам V_{nm} :

$$V = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n V_{nm} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos m\phi + b_{nm} \sin m\phi) P_{nm}(\cos \theta) / r^{n+1}, \quad (6)$$

где a_{nm} , b_{nm} — коэффициенты; $P_{nm}(\cos \theta)$ — присоединенные функции Лежандра первого рода; индекс n определяет степень, а m — порядок функции Лежандра и соответствующей ей ПСГ; при $m = 0$ ПСГ называются зональными, при $n = m$ — секториальными, а при $n \neq m$ — тессериальными.

Решение уравнения Лапласа в виде ряда (6) можно также интерпретировать как разложение магнитного потенциала V по магнитным мультиполям — элементарным точечным источникам ВМП. Каждая из ПСГ вида V_{nm} описывает потенциал некоторого магнитного мультиполя с определенным положением его магнитных осей. Мультиполя низших степеней имеют названия: при $n = 1$ — диполь, $n = 2$ — квадруполь, $n = 3$ — октуполь и т.д. Значение потенциала отдельных гармоник (и соответствующих им мультиполей) зависит от коэффициентов a_{nm} , b_{nm} , которые определяются из граничных условий.

Известно, что решение (6) уравнения Лапласа единственно, если на внешней поверхности

МПТ задано распределение скалярного магнитного потенциала V_S (задача Дирихле). В рассматриваемом нами случае это распределение можно найти через линейный интеграл от напряженности H магнитного поля в станине между двумя произвольными точками ее поверхности. Но с учетом того, что напряженность H имеет только азимутальную компоненту, вместо произвольного пути можно взять дугу окружности между образующими цилиндрической поверхности, проходящими через эти точки:

$$V_S = \int H \cdot d\mathbf{l} = \int H \cdot R \cdot d\phi, \quad (7)$$

где R — радиус внешней поверхности станины.

Из-за конечной длины станины прямое решение задачи вызывает большие затруднения. Поэтому в настоящей работе предложен иной подход. Очевидно, что если в выбранной физической модели граничные условия (магнитное напряжение) на рассматриваемой внешней поверхности останутся такими же, как и в реальной машине, то аналогичным будет и создаваемое ими ВМП.

В качестве расчетной модели примем цилиндрическое тело из ферромагнитного материала (рис.3), имеющего бесконечно большую магнитную проницаемость ($\mu = \infty$). Длина и внешний диаметр тела равны соответствующим размерам станины. Влиянием ферромагнитных торцевых щитов машины пренебрежем. На цилиндрической части внешней поверхности расчетной модели для сохранения исходных граничных условий введем поверхностные токи, определив вектор \mathbf{A} их линейной плотности соотношением:

$$\mathbf{A} = \mathbf{H} \times \mathbf{n},$$

где \mathbf{n} — вектор единичной нормали к внешней поверхности станины в рассматриваемой точке.

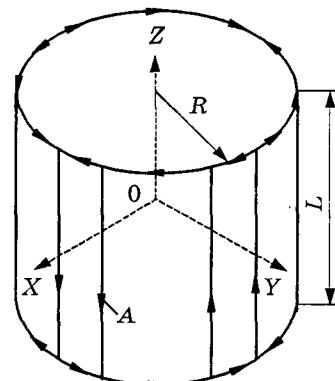


Рис.3. Моделирующие поверхностные токи для расчета ВМП МПТ

В соответствии с этим выражением моделирующая граничные условия линейная плотность тока \mathbf{A} будет иметь одну аксиальную компоненту, поскольку по принятому допущению на внешней поверхности станины напряженность магнитного поля \mathbf{H} имеет только азимутальную компоненту. На торцах цилиндрического тела введенные подобным образом поверхностные токи замыкаются по окружностям — границе цилиндрической поверхности.

Введем для поверхностного тока A интегральную функцию F — МДС:

$$F = \int A R d\phi = \int H R d\phi = (H_q \sin p\phi - H_d \cos p\phi) R/p. \quad (8)$$

Из сравнения выражений (7) и (8) видно, что МДС F и магнитное напряжение V_s на цилиндрической поверхности рассматриваемой модели имеют одинаковый физический смысл.

Упростим далее нашу расчетную модель. С этой целью учтем приближенно усиливающее действие на ВМП поверхностных токов идеального ферромагнитного тела и исключим его из модели. Пренебрежем зависимостью этого усиления от длины исходной модели и воспользуемся приведенным в приложении 5 [5] результатом расчета магнитного поля гармонического поверхностного тока для того частного случая, когда ток расположен на поверхности бесконечно протяженного цилиндрического ферромагнитного тела с $\mu = \infty$. Из него следует, что наличие ферромагнитного тела приводит к усилению поля во внешней области в 2 раза.

Таким образом, упрощенная расчетная модель будет включать только цилиндрический поверхностный токовый слой, расположенный в вакууме. Исключение из исходной модели на рис.3 ферромагнитного тела учтем, удвоив результирующее выражение для ВМП этого тока.

Для расчета ВМП упрощенной расчетной модели воспользуемся полученными нами в [6] результатами решения во внешней области уравнения Лапласа для скалярного магнитного потенциала распределенного по цилиндрической поверхности гармонического токового слоя. Как видно из общего выражения (6), по мере удаления от начала координат во внешнем поле увеличивается относительный вес гармоник низших степеней, так как потенциал ПСГ пропорционален $\sim 1/r^{n+1}$. Это свойство дает возможность

при достаточном удалении от корпуса МПТ ограничиться учетом только одной пространственной гармоники наиболее низкой степени, которая в рассматриваемом случае будет иметь секториальный тип V_{pp} ($n=m=p$). Однако при необходимости для повышения точности расчета ВМП можно взять любое требуемое для этого число как гармоник разложения напряженности магнитного поля на поверхности станины в ряд Фурье, так и ПСГ. Подставляя в полученное в [6] выражение для основной гармоники скалярного магнитного потенциала формулу (8) для МДС и учитывая усиливающее действие (в два раза) ферромагнитной массы станины, после некоторых преобразований получаем:

$$V_{pp} = L(R/r)^{p+1} (H_q \sin p\phi - H_d \cos p\phi) P_{pp}(\cos\theta)/2p, \quad (9)$$

где L — длина станины.

Как видно из полученного выражения (9), скалярный магнитный потенциал ВМП прямо пропорционален напряженности магнитного поля в станине. Поэтому при разработке МПТ с пониженным уровнем ВМП целесообразно стремиться к снижению значения приповерхностной напряженности магнитного поля в станине. Этого можно добиться как снижением значения индукции, так и изготовлением станины из ферромагнитных материалов с высоким значением магнитной проницаемости. Напряженность в других частях магнитопровода, а также в воздушном зазоре на ВМП существенного влияния не оказывает. Из выражения (9) также видно, что магнитный потенциал пропорционален длине станины в первой степени, а ее радиусу — в степени ($p+1$), т.е. для некоторого снижения уровня ВМП лучше иметь станину большей длины, но меньшего радиуса.

Напряженность ВМП может быть определена путем взятия градиента (5) от скалярного потенциала (9).

Проанализируем влияние тока нагрузки на ВМП МПТ. Для большей наглядности будем использовать формулы (4), соответствующие ступенчатой аппроксимации (рис.1,б). Очевидно, что это влияние зависит от способа возбуждения и степени насыщения станины.

При последовательном возбуждении и ненасыщенном магнитопроводе магнитные потоки в станине от всех обмоток алгебраически суммируются и напряженности H_1 и H_2 , а следовательно, и скалярный магнит-

ный потенциал V будут пропорциональны току якоря. При насыщенной станине, вследствие нелинейной зависимости напряженности магнитного поля от индукции, ВМП изменяется в значительно большей степени, чем ток якоря.

При независимом возбуждении и ненасыщенном магнитопроводе ВМП распадается на две несвязанные между собой составляющие (4): $H_d \sim (H_2 + H_1)$ — независящую от тока якоря и обусловленную потоком главных полюсов и $H_q \sim (H_2 - H_1)$ — нагрузочную, пропорциональную току якоря. Увеличение тока нагрузки приводит к возрастанию общего уровня ВМП только за счет составляющей H_q . Изменение тока нагрузки изменяет также соотношение составляющих H_d и H_q напряженности магнитного поля в станине и соответствующих составляющих ВМП, что приводит к повороту магнитных осей ПСГ по координате ϕ . При насыщенном магнитопроводе от тока нагрузки зависят обе составляющие (4).

Период основного ВМП зависит от периодичности распределения токов различных обмоток МПТ и сред, по которым замыкается магнитный поток [5]. При сделанном нами допущении о степени осевой симметрии обмоток и магнитопровода наименьшая степень ПСГ, как это видно из (9), соответствует периоду основного магнитного поля внутри машины, т.е. числу пар полюсов p .

Степень осевой симметрии магнитопровода и обмоток в реальной МПТ может быть меньше числа полюсов. Например, у магнитопровода — вследствие неодинакового воздушного зазора под полюсами, наличия сварных швов в станине, анизотропии и т.д. В обмотках также есть различные соединения и выводы, токовые контуры которых имеют другую, как правило, меньшую степень симметрии. Все это приводит к тому, что в многополюсной машине ($2p > 2$), ВМП которой описывается выражением (9), могут появиться ПСГ дипольного вида (V_{11} или V_{10}), которые спадают наиболее медленно, и на достаточноном удалении от корпуса их поле будет превалировать над полем ПСГ более высоких степеней.

Исходя из выражения (9), можно сделать вывод, что в наибольшей степени ВМП МПТ (особенно многополюсных) зависит от тех конструктивных и иных «несимметрий», которые влияют на распределение напряженности поля в станине и, следовательно, маг-

нитного потенциала на ее поверхности.

Обычно магнитная цепь МПТ при расчете по общепринятым методикам [3] принимается симметричной, что не вносит в этот расчет существенной погрешности. Влияние как отмеченных выше, так и других «несимметрий» реальной МПТ на напряженность магнитного поля в станине и на ВМП в целом трудно рассчитать аналитически. Кроме специфической трудности их математического моделирования это обусловлено различными причинами: конструктивно-технологическими — случайным характером отклонений конструктивных размеров в процессе производства (толщина станины, зазоры и т.п.); физическими — разбросом магнитных характеристик материала станины и сварных швов, вследствие чего на стадии расчета могут быть использованы лишь их усредненные значения.

Здесь следует отметить, что разброс магнитных характеристик в значительно большей степени влияет на погрешность определения ВМП, чем на расчет магнитной цепи МПТ. Как видно из выражения (9), это связано с тем, что ВМП прямо пропорционально напряженности магнитного поля в станине. В то же время даже существенная погрешность в определении этой напряженности мало сказывается на точности расчета магнитной цепи в целом, так как в ней имеется воздушный зазор, на который падает большая часть МДС обмоток.

Принятые в настоящей работе допущения являются обычными для подобного класса задач, поэтому можно ожидать, что полученные выражения (2), (3) и (9), описывающие ВМП идеализированной МПТ, не содержат большой методической ошибки. Однако с учетом отмеченных особенностей, по распределению напряженности магнитного поля (рис.1), полученному по данным расчета симметричной магнитной цепи, можно выполнить лишь оценочное определение ВМП реальной МПТ, в особенности многополюсной. Если же данные расчета магнитной цепи будут учитывать отмеченные несимметрии, то и точность определения ВМП будет более высокой.

Полученные с использованием изложенного метода расчетные выражения имеют теоретическое и практическое значение, позволяя анализировать и прогнозировать влияние различных факторов на ВМП МПТ, что было выполнено нами выше. Метод спра-

ведлив и для МПТ с шихтованным магнитопроводом статора с учетом особенностей распределения напряженности магнитного поля на его поверхности. В случае, если статор установлен в ферромагнитном корпусе, то в выражении (9) необходимо использовать результаты разложения в ряд Фурье распределения напряженности магнитного поля в этом корпусе.

Эта же методика может быть также использована для определения ВМП, обусловленного рассеянием с цилиндрической поверхности сердечников асинхронных и синхронных машин [7].

Список литературы

1. Ollendorff F. Potentialfelder der Elektrotechnik// Verlag J. Springer. Berlin, 1932.
2. Математический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1988.

3. Проектирование электрических машин. Кн.2/ И.П.Копылов, Б.К.Клоков, В.П.Морозкин, Б.Ф.Токарев. М.: Энергоатомиздат, 1993.

4. Шимони К. Теоретическая электротехника. М.: Мир, 1964.

5. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. М.: Энергия, 1969.

6. Сотников В.В. Внешнее магнитное поле гармонического тока, распределенного по цилиндрической поверхности конечной длины//Техническая электродинамика. 1986. № 6. С.9—14.

7. Сотников В.В. Обзор методов расчета внешнего магнитного поля электрических машин переменного тока// Известия РАН. Энергетика. 1994. № 4. С.122—129.

Сотников Владимир Васильевич — доцент кафедры электротехники и теплотехники Марийского государственного технического университета. В 1973 г. окончил электромашиностроительный факультет Харьковского политехнического института по специальности «Электрические машины». В 1983 г. в Харьковском политехническом институте защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Экранирующие устройства переменного внешнего магнитного поля асинхронных двигателей».

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Синтез СПР скорости неустойчивого, под влиянием отрицательного вязкого трения, объекта методом полиномиальных уравнений

Л.В.АКИМОВ, доктор техн. наук., проф., В.И.КОЛОТОЛО, инж.

Харьковский ГПУ

Для электроприводов постоянного тока при критических значениях отрицательного вязкого трения в характере нагрузки методом полиномиальных уравнений с использованием стандартных распределений синтезированы и исследованы статическая и астатическая системы подчиненного регулирования скорости, имеющие требуемое качество переходных процессов. Найденные типы регуляторов скорости обеспечивают работу электропривода как на падающем, так и на восходящем участках характеристики нагрузки даже при сильном влиянии ЭДС двигателя и значительном изменении коэффициента вязкого трения. Даны аналитические зависимости ошибок по управляемому и возмущающему воздействиям для статической системы.

Известно [1], что для ряда рабочих машин (транспортные механизмы с трением, дробилки, вальцы в резиновой промышленности, каландры в текстильной промышленности, моталки в металлургической промышленности) при увеличении скорости в области ее малых и средних значений наблюдается уменьшение момента сопротивления M_c . Механические характеристики этих механизмов относят к характеристикам падающего момента в отличие от характеристик

восходящего момента, имеющих место, например, в механизмах, преодолевающих сопротивление воздуха или жидкости. В [2] на основании анализа характеристик трения механизмов впервые предложено при исследованиях работы электромеханических систем (ЭМС) учитывать как положительное, так и отрицательное вязкое трение. Это обуславливает наличие в механической характеристике нагрузки участков восходящего и падающего моментов с жесткостью $\pm \beta_c$.

Следствие нелинейности механической характеристики нагрузки в ЭМС — автоколебательные режимы [3], ухудшающие качество технологического процесса и снижающие из-за поломок кинематических звеньев надежность работы. В [4] дан анализ проблемы управления ЭМС с отрицательным вязким трением (ОВТ) и приведен достаточно подробный библиографический указатель по данному вопросу. Там же отмечено, что для ряда рабочих машин (например, при волочении, резании и т.д.) характерна непрерывная работа механизма на падающем участке характеристики нагрузки в течение длительного времени согласно условиям протекания технологического процесса. В [5] показано, что использование модального регулятора совместно с наблюдателем состояния гарантировано обеспечивает требуемую динамику ЭМС с ОВТ даже при учете упругости в кинематике механизмов. Для однодисковых ЭМС с системами подчиненного регулирования (СПР) в [6] корневым методом найдены параметры ПИ-регуляторов тока (РТ) и скорости (РС), обеспечивающие заданное качество переходных процессов в ЭМС с отрицательным вязким трением при условии, что жесткость падающего участка характеристики нагрузки $\beta_c < 0$ находится в пределах, не нарушающих устойчивость объекта. Для расширения зоны устойчивости при критических значениях $\beta_{c,kr} < 0$ в [7] предложено вводить дополнительную гибкую отрицательную обратную связь по току на вход преобразователя, что усложняет систему.

Таким образом, можно прийти к выводу, что проблема обеспечения заданного качества управления неустойчивым объектом в силу влияния критических значений ОВТ еще окончательно не решена. В связи с этим

представляет интерес, не выходя за рамки принципа последовательной коррекции, найти структуру и параметры РС при традиционной настройке РТ для случая, когда жесткость механической характеристики нагрузки $\beta_c < 0$ имеет значения $\beta_{c,kp}$, приводящие к неустойчивости объекта — двигателя постоянного тока совместно с исполнительным механизмом.

Цель исследования состоит в синтезе предложенным в [8] методом полиномиальных уравнений передаточной функции и параметров РС системы подчиненного регулирования для случая, когда одномассовая механическая часть двигателя совместно с механизмом, создающим нагрузки под влиянием отрицательного вязкого трения критических значений, представляет собой неустойчивый объект управления.

Структурная схема СПР скорости электропривода тиристорный преобразователь — двигатель с традиционно настроенным на модульный оптимум контуром тока и неустойчивой механической частью представлена на рис.1.

В соответствии со структурной схемой дифференциальное уравнение механической части может быть записано как

$$J \frac{d\omega}{dt} = C\Phi I - (-\beta_{c,kp})\omega , \quad (1)$$

где $\beta_{c,kr}$ – критическое значение жесткости механической характеристики механизма в точке, где производится ее линеаризация или критическое значение коэффициента ОВТ, Н·м·с.

Уравнение (1) легко приводится к виду

$$T_c \frac{d\omega}{dt} - \omega = K_1 I, \quad (2)$$

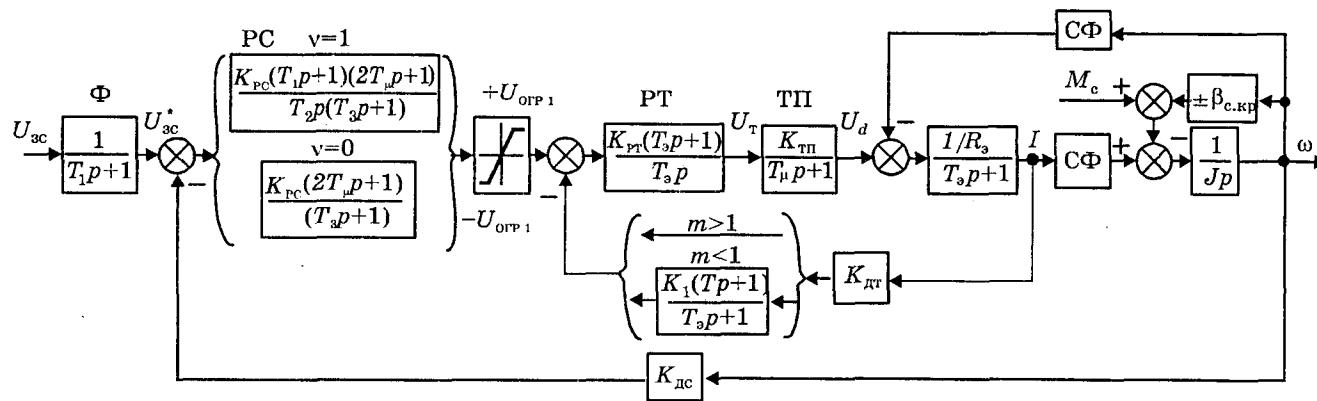


Рис.1. СПР скорости электропривода постоянного тока с влиянием ОВТ при критических значениях жесткости характеристики нагрузки

где $T_0 = \frac{J}{\beta_{0, \text{кр}}}$ — механическая постоянная времени, с; $K_1 = \frac{C\Phi}{\beta_{0, \text{кр}}}$ — коэффициент пропорциональности, связывающий ток двигателя с его скоростью, $(\text{A}\cdot\text{с})^{-1}$.

Согласно уравнению (2) передаточную функцию механической части электропривода можно представить как

$$W_{\text{м.ч}}(p) = \frac{K_1}{T_0 p - 1}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что данное звено имеет отрицательное самовыравнивание и относится к неминимально-фазовым звеньям, так как имеет большой фазовый сдвиг, определяемый выражением [9]

$$\varphi = \arctg \frac{\omega T_0}{-1} = -180^\circ + \arctg \omega T_0.$$

В дальнейшем, условно пренебрегая влиянием ЭДС двигателя, рассмотрим два случая.

Случай 1. Синтезируемая система должна обладать астатизмом первого порядка ($v=1$).

Введем в рассмотрение упрощенную передаточную функцию оптимизированного контура тока

$$W_{\text{о.к.т}}(p) = \frac{1/K_{\text{дт}}}{2T_\mu p + 1}, \quad (4)$$

где T_μ — постоянная времени тиристорного преобразователя, с; $K_{\text{дт}}$ — коэффициент усиления датчика тока, В/А.

На основании рис.1, а также формул (3) и (4) неустойчивый объект представляется передаточной функцией

$$W_0(p) = \frac{K_0}{(2T_\mu p + 1)(T_c p - 1)} = \frac{P(p)}{Q(p)};$$

$$K_0 = \frac{1}{K_{\text{дт}}} K_1 K_{\text{дс}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{дс}}$ — коэффициент передачи датчика скорости, В·с; K_0 — коэффициент усиления объекта, $(\text{В}\cdot\text{с})^{-1}$.

Следуя методике [8], примем передаточную функцию РС в виде

$$W_{\text{РС}}(p) = \frac{Q_{k+}(p)M(p)}{K_0 P_{k+}(p)p^{v-s} N(p)}, \quad (6)$$

где $M(p)$ и $N(p)$ — неизвестные полиномы,

определенные из предложенного там же полиномиального уравнения синтеза

$$M(p)P_{-}(p)P_{n+}(p) + N(p)Q_{-}(p)Q_{n+}(p)p^v = G(p). \quad (7)$$

В уравнениях (6) и (7) приняты следующие обозначения:

$P_{k+}(p)$, $Q_{k+}(p)$ — полиномы числителя и знаменателя передаточной функции объекта управления (5), имеющие в качестве своих нулей только левые нули и полюсы, компенсируемые, как видно из (6), при помощи регулятора;

$P_{n+}(p)$, $Q_{n+}(p)$ — полиномы числителя и знаменателя передаточной функции объекта управления (5), имеющие левые нули и полюсы, в компенсации которых нет необходимости;

$P_{-}(p)$, $Q_{-}(p)$ — полиномы объекта управления, имеющие правые нули и полюсы, а также нейтральные, за исключением расположенных в точке $p=0$; их компенсация неприемлема из-за нарушения условий грубости;

$s = 0, 1, 2, \dots$ — количество полюсов объекта управления, расположенных в точке $p=0$;

v — желаемый порядок астатизма замкнутой системы;

$G(p)$ — задаваемый характеристический полином замкнутой системы, исходя из условия обеспечения желаемого характера переходного процесса, в частности, отвечающий одному из известных стандартных распределений [10].

Обозначим степень полиномов в виде $| \cdot |$. Тогда на основании (5) можно записать:

$$P(p) = K_0; \quad P_{k+}(p) = P_{n+}(p) = P_{-}(p) = 1;$$

$$Q(p) = (2T_\mu p + 1)(T_c p - 1); \quad Q_{k+}(p) = (2T_\mu p + 1);$$

$$Q_{n+}(p) = 1; \quad Q_{-}(p) = T_c p - 1;$$

$$| P_{k+} | = 0; \quad | Q | = 2; \quad | Q_{n+} | = 0; \quad | Q_{-} | = 1; \quad s = 0,$$

откуда для степени полиномов $M(p)$ и $N(p)$, а также степени характеристического полинома $G(p)$, найдем [8]:

$$\begin{cases} | M | = | Q_{-} | + | Q_{n+} | + v - 1 = 1 - 0 + 1 - 1 = 1; \\ | N | = | Q | - | P_{k+} | - 1 = 2 - 0 - 1 = 1; \\ | G | = | M | + | N | + 1 = 3. \end{cases} \quad (8)$$

На основании (7) с учетом (8) запишем полиномиальное уравнение синтеза

$$\begin{aligned} m_{11}p + m_{01} + (n_{11}p + n_{01})(T_c p - 1)p &= T_c n_{11}p^3 + \\ + (n_{01}T_c - n_{11})p^2 + (m_{11} - n_{01})p + m_{01} &= \\ = T_0^3 p^3 + \alpha_1 T_0^2 p^2 + \alpha_2 T_0 p + 1, \end{aligned} \quad (9)$$

где T_0 – эквивалентная постоянная времени, связанная со значением среднегеометрического корня создаваемой ЭМС соотношением

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{aT_\mu}; \quad a \geq 2, \quad (10)$$

которое в данном случае может задаваться произвольно, исходя из быстродействия внутреннего контура тока.

Легко видеть, что при задании ω_0 или T_0 , уравнение (9) распадается на четыре алгебраических уравнения относительно неизвестных коэффициентов полиномов $M(p)$ и $N(p)$, входящих в состав РС. В данном случае коэффициенты рассчитываются по выражениям:

$$\begin{aligned} m_{01} &= 1; \quad n_{11} = \frac{T_0^3}{T_c} = \frac{1}{\omega_0^3 T_c}; \quad n_{01} = \frac{\alpha_1 T_0^2 + n_1}{T_c} = \\ &= \frac{T_0^2}{T_c} \left(\alpha_1 + \frac{T_0}{T_c} \right) = \frac{1}{\omega_0^2 T_c} \left(\alpha_1 + \frac{1}{\omega_0 T_c} \right); \quad (11) \\ m_{11} &= \alpha_2 T_0 + n_{01} = \frac{1}{\omega_0} \left[\alpha_2 + \frac{1}{\omega_0 T_c} \left(\alpha_1 + \frac{1}{\omega_0 T_c} \right) \right]. \end{aligned}$$

В результате проведенного синтеза передаточная функция РС представляется как

$$\begin{aligned} W_{pc1}(p) &= \frac{(T_1 p + 1)(2T_\mu p + 1)}{K_0 T_2 p (T_{31} p + 1)} = \\ &= \frac{K_{pc1} (T_1 p + 1)(2T_\mu p + 1)}{T_2 p (T_{31} p + 1)}, \quad (12) \end{aligned}$$

где $T_1 = m_{11}$; $T_2 = n_{01}$;

$$T_{31} = \frac{n_{11}}{n_{01}} = \frac{1}{\omega_0 \left(\alpha_1 + \frac{1}{\omega_0 T_c} \right)}; \quad K_{pc1} = \frac{1}{K_0}.$$

Из (12) следует, что при $v=1$ в качестве РС необходимо выбрать ПИД-регулятор и иметь на его выходе фильтр с постоянной времени T_{31} . При этом передаточная функция замкнутой ЭМС

$$W_{EMC1}(p) = \frac{(1/K_{DC})\omega_0^3(T_1 p + 1)}{p^3 + \alpha_1 \omega_0 p^2 + \alpha_2 \omega_0^2 p + \omega_0^3}. \quad (13)$$

Наличие в выражении (13) форссирующего звена вынуждает устанавливать на входе системы фильтр с передаточной функцией

$$W_\Phi(p) = \frac{1}{T_1 p + 1}.$$

Случай 2. Система обладает нулевым астатизмом ($v=0$).

На основании (8) для степени полиномов $M(p)$, $N(p)$ и $G(p)$ будем иметь: $|M| = 0$; $|N| = 1$; $|G| = 2$.

Полиномиальное уравнение синтеза второго порядка с учетом стандартного распределения полюсов запишется в виде

$$m_{02} + (n_{12} p + n_{02})(T_c p - 1) = T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1, \\ 2\xi = \alpha_1, \quad (14)$$

на основании которого получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} n_{12} T_c = T_0^2 = \frac{1}{\omega_0^2}; \\ n_{02} T_c - n_{12} = 2\xi T_0 = \alpha_1 \omega_0; \\ m_{02} - n_{02} = 1. \end{cases} \quad (15)$$

Зададимся эквивалентной постоянной времени T_0 по (10). Тогда для коэффициентов полиномов $M(p)$ и $N(p)$ найдем:

$$\begin{aligned} n_{12} &= \frac{T_0^2}{T_c} = \frac{1}{T_c \omega_0^2}; \quad n_{02} = \frac{2\xi T_0 + \frac{T_0^2}{T_c}}{T_c} = \frac{1}{\omega_0 T_c} \left(2\xi + \frac{1}{\omega_0 T_c} \right); \\ m_{02} &= 1 + \frac{1}{\omega_0 T_c} \left(2\xi + \frac{1}{\omega_0 T_c} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

При этом для передаточной функции РС можно записать

$$W_{PC2}(p) = \frac{m_{02}(2T_\mu p + 1)}{n_{02} K_0 (T_{32} p + 1)} = \frac{K_{PC2} (2T_\mu p + 1)}{(T_{32} p + 1)},$$

$$T_{32} = \frac{n_{12}}{n_{02}}; \quad K_{PC2} = \frac{m_{02}}{n_{02} K_0}. \quad (17)$$

Таким образом, при нулевом астатизме замкнутой системы регулирования скорости в качестве РС следует использовать ПД-регулятор и иметь на его выходе фильтр с постоянной времени T_{32} .

Передаточная функция замкнутой системы представляется в виде

$$W_{EMC0}(p) = \frac{(1/K_{DC})\omega_0^2 m_{02}}{p^2 + \alpha_1 \omega_0 p + \omega_0^2}. \quad (18)$$

Система с $v=0$ имеет ошибки по управляемому и возмущающему воздействию:

$$\Delta \omega_u = - \frac{4T_\mu}{T_c} \left(1 + \frac{2T_\mu}{T_c} \right) \frac{U_{DC}}{K_{DC}}; \quad (19)$$

$$\Delta\omega_{ct} = -\frac{4T_\mu}{T_c} \left(1 + \frac{2T_\mu}{T_c}\right) \frac{M_c}{\beta_c}. \quad (20)$$

Проведем исследование синтезированных систем с учетом ЭДС двигателя, при $\beta_{c,kr} = var < 0$ и различных стандартных распределениях.

Возьмем электропривод ТП-Д со следующими параметрами силовой части: $K_{TP} = 51,3$; $T_\mu = 0,004$ с; $R_s = 0,087$ Ом; $L_s = 6,873 \cdot 10^{-3}$ Гн; $T_s = 0,079$ с; $J = 20$ кг·м²; СФ = 2,68 В·с; $T_m = 0,242$ с; $m = T_m/T_s = 3,06$; $U_h = 440$ В; $I_h = 400$ А; $\omega_h = 157$ с⁻¹; $M_h = 1070$ Н·м.

При жесткости механической характеристики двигателя $\beta = (СФ)^2/R_s = 82,5$ Н·м·с зададимся критическим значением ОВТ $\beta_{c,kr} = -100$ Н·м·с, при котором параметр $b = \beta_{c,kr}/\beta = -1,212$. Принятое значение $\beta_{c,kr}$ усугубляет решаемую задачу условием статической неустойчивости электропривода, что вполне допустимо, учитывая случайный характер коэффициента ОВТ.

Зададимся $U_{3C} = 10$ В, $K_{DC} = 0,0638$ В·с, $K_{DT} = 0,005$ В/А, $K_{PT} = 3,35$ и найдем механическую постоянную времени $T_c = J/\beta_{c,kr} = 0,2$ с, а также коэффициент усиления объекта $K_0(5) = 0,342$.

Для сравнения выберем два стандартных распределения: фильтр Баттерворт и биномиальное, характеристические полиномы которых для систем второго ($n=2$) и третьего ($n=3$) порядков имеют вид [10]:

$$\begin{aligned} n = 2 \quad G(p)_{21} &= p^2 + 1,41\omega_0 p + \omega_0^2; \\ &G(p)_{22} = p^2 + 2\omega_0 p + \omega_0^2; \\ n = 3 \quad G(p)_{31} &= p^3 + 2\omega_0 p^2 + 2\omega_0^2 p + \omega_0^3; \\ &G(p)_{32} = p^3 + 3\omega_0 p^2 + 3\omega_0^2 p + \omega_0^3. \end{aligned}$$

В случае системы с астатизмом $v=1$ для коэффициентов полиномов $M(p)$ и $N(p)$, а также параметров РС по (11) и (12) при $T_0 = 2T_\mu$, которое в соответствии с (10) обеспечивает значение среднегеометрического корня замкнутой ЭМС $\omega_{01} = 125$ с⁻¹ найдено:

при настройке по Баттерворту

$$\begin{aligned} m_{11} &= 0,01665; \quad m_{01} = 1, \quad n_{11} = 2,56 \cdot 10^{-6}, \\ n_{01} &= 6,53 \cdot 10^{-4}, \quad T_1 = 0,01665 \text{ с}, \quad T_2 = 6,53 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \\ T_3 &= 0,392 \cdot 10^{-2} \text{ с}, \quad K_{PC1} = 2,92; \end{aligned}$$

при настройке с использованием биномиального распределения

$$\begin{aligned} m_{11} &= 0,025; \quad m_{01} = 1, \quad n_{11} = 2,56 \cdot 10^{-6}, \quad n_{01} = \\ &= 9,75 \cdot 10^{-4}, \quad T_1 = 0,025 \text{ с}, \quad T_2 = 9,75 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \\ T_3 &= 0,262 \cdot 10^{-2} \text{ с}, \quad K_{PC1} = 2,92. \end{aligned}$$

Для системы с астатизмом $v=0$ по (16) и (17) определено:

при настройке по Баттерворту и

$$T_0 = 2\sqrt{2}T_\mu, \quad \omega_{02} = 88,5 \text{ с}^{-1}$$

$$m_{02} = 1,083; \quad n_{12} = 6,4 \cdot 10^{-4}, \quad n_{02} = 0,083, \\ T_{32} = 0,762 \cdot 10^{-2} \text{ с}, \quad K_{PC2} = 38,2;$$

при настройке с использованием биномиального распределения и $T_0 = 2T_\mu$

$$m_{02} = 1,0815; \quad n_{12} = 3,2 \cdot 10^{-4}, \quad n_{02} = 0,0815, \\ T_{32} = 0,394 \cdot 10^{-2} \text{ с}, \quad K_{PC2} = 38,8.$$

На рис.2 показаны осциллограммы, полученные в результате компьютерных исследований астатической ЭМС с приведенными выше параметрами при учете ЭДС двигателя. Анализ осциллограмм на рис.2,а,б показывает, что изменение жесткости $\beta_{c,kr}$ механической характеристики нагрузки в четыре раза практически не сказывается на показателях качества регулирования при толчке задания. Однако из-за меньшей колебательности процессов (рис.2,б) следует отдать предпочтение биномиальному распределению корней, так как оно обеспечивает время регулирования $t_{reg,2} = 0,15$ с, что в три раза меньше $t_{reg,1} = 0,45$ с, соответствующего распределению по Баттерворту. Кроме того, биномиальное распределение сопровождается значительно меньшим числом колебаний.

Из процессов на рис.2,в—е следует, что ЭМС успешно работает в случаях $\beta_{c,kr} = -100$ Н·м·с, $M_{c0} = 0$ и $M_{c0} = M_h$. Однако и здесь при действии нагрузки более колебательными являются процессы при настройке по Баттерворту. Необходимо отметить, что система сохраняет работоспособность при широком диапазоне изменения жесткости механической характеристики нагрузки в пределах $\beta_c > 0$ и $\beta_c < 0$.

Процессы на рис.2,ж—з характеризуют переходные характеристики ошибки. При отсутствии статической ошибки $\Delta\omega_{ct} = 0$ динамическая ошибка и колебательность процесса меньше при биномиальном распределении, которому, по-видимому, и следует отдать предпочтение.

На рис.3 приведены процессы в статической ЭМС при ее настройке по Баттерворту и жесткости $\beta_{c,kr} = -100$ Н·м·с. Из осциллограммы на рис.2,а видно влияние коэффициента ОВТ на быстродействие. Уменьшение жесткости $\beta_{c,kr}$ по отношению к расчетному приводит к уменьшению быстродействия, в то время как ее увеличение сопро-

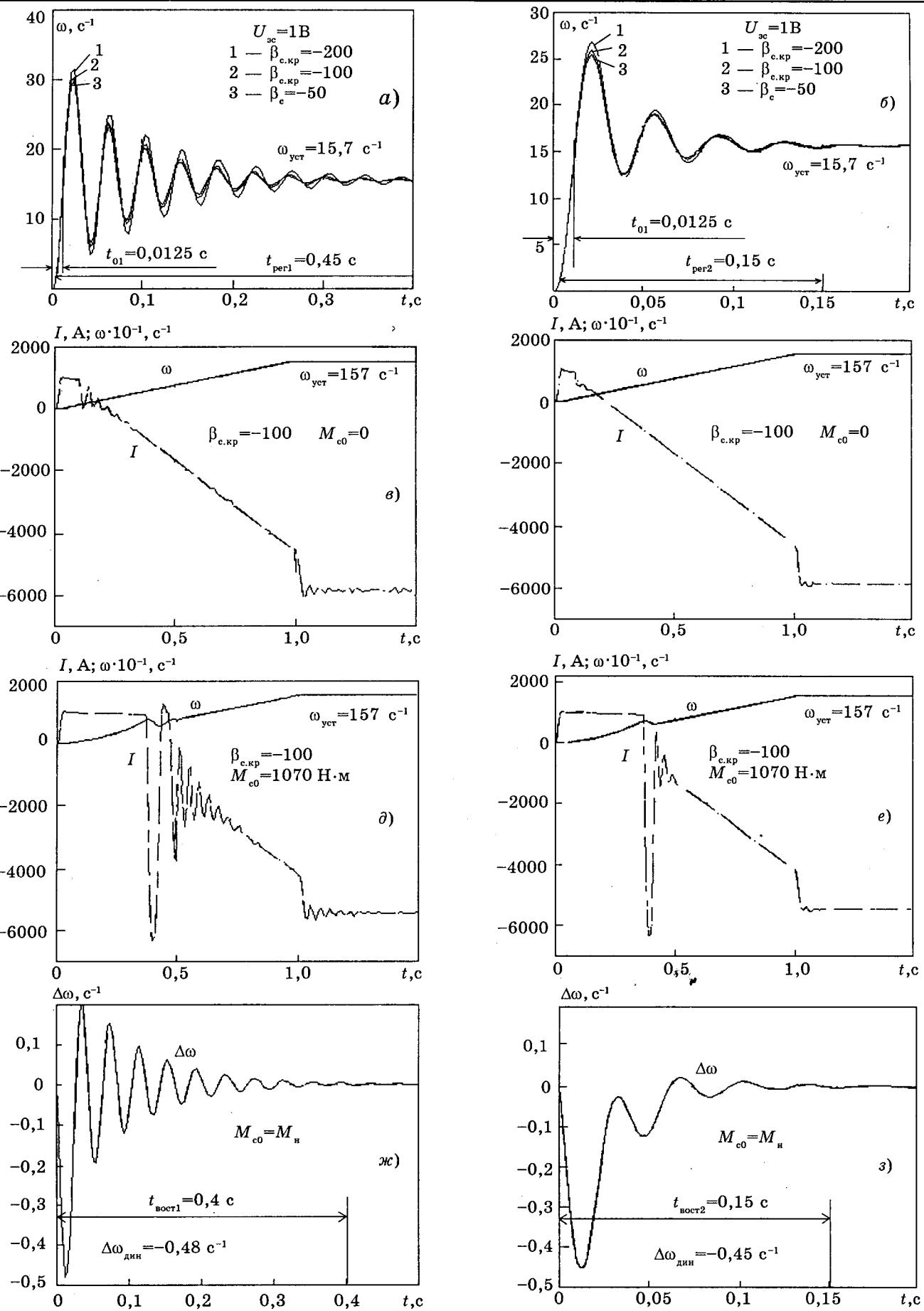
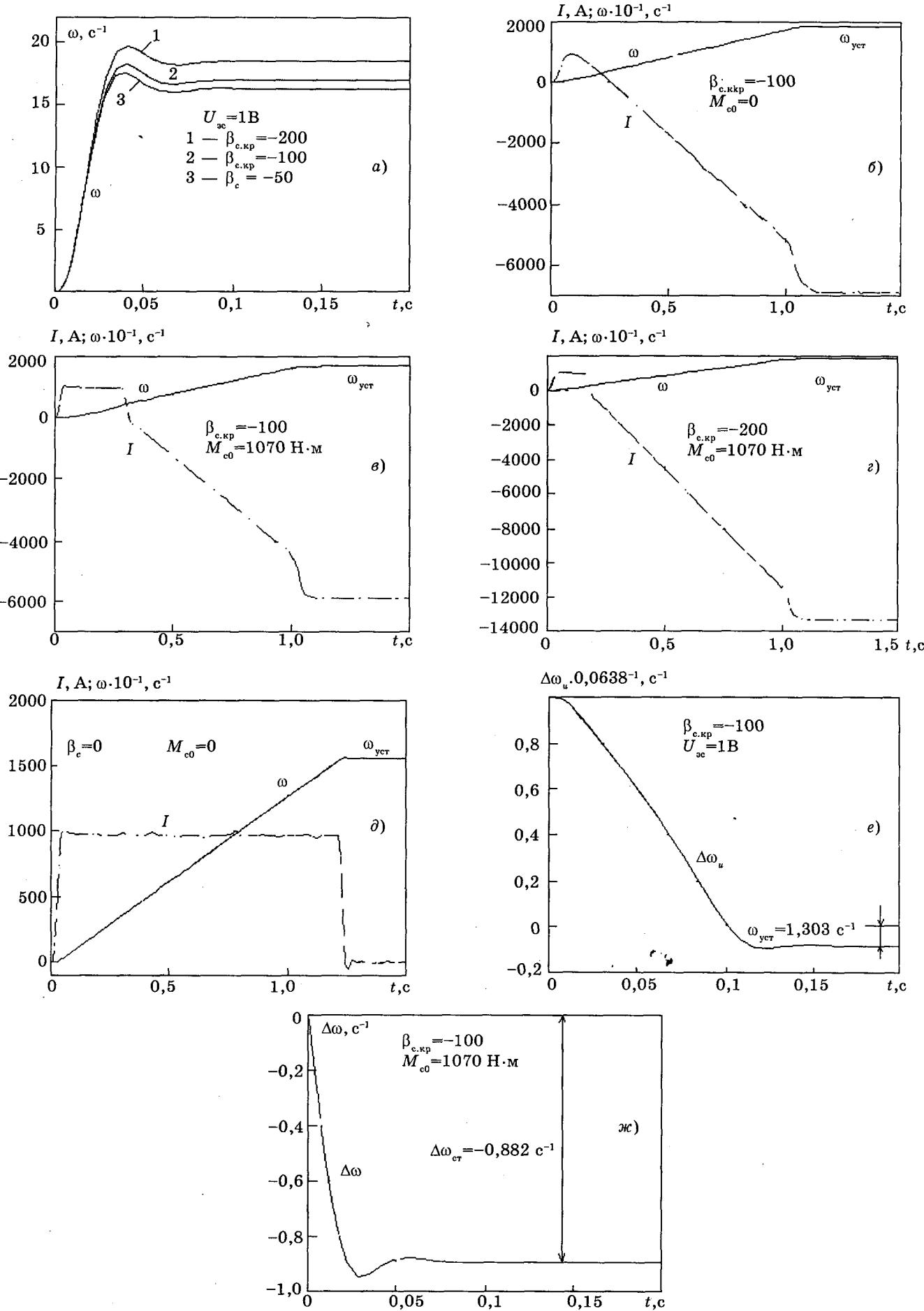


Рис.2. Переходные процессы в астатической ($v=1$) СПР скорости без компенсации влияния ЭДС двигателя при настройке на различные стандартные распределения

Рис.3. Переходные процессы в статической ($v=0$) СПР скорости при настройке по Баттерворту

вождается повышением быстродействия. Кроме того, вариация $\beta_{c,kr}$ приводит к ошибкам в отработке сигналов задания, изменяющих свой знак в зависимости от отклонения вверх или вниз от принятого при расчете значения $\beta_{c,kr}$.

Из процессов на рис.3,б—д видно, что система с $v=0$ успешно работает при $\beta_{c,kr} = -200 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, $\beta_c = 0$, $M_{c0} = 0$, $M_{n0} = M_n$. Все это убеждает в перспективности использования синтезированного РС с целью обеспечения не только устойчивости системы при критических значениях $\beta_{c,kr} < 0$, но и для получения в электроприводе требуемого качества переходных процессов.

На осциллограммах рис.3,е,ж показаны переходные характеристики ошибок по управлению $\Delta\omega_u$ и возмущению $\Delta\omega_{ct}$. Получаемые при этом экспериментальные значения ошибок полностью совпадают с результатами, следующими из найденных аналитических зависимостей (19) и (20):

$$\Delta\omega_{u0} = -1,303 \text{ с}^{-1}; \Delta\omega_u(19) = -1,304 \text{ с}^{-1}; \\ \Delta\omega_{ct,0} = -0,882 \text{ с}^{-1}; \Delta\omega_{ct}(20) = -0,89 \text{ с}^{-1}.$$

Рассмотрим особенности динамики электропривода, в котором имеет место сильное влияние ЭДС двигателя на качество переходных процессов.

Такой ЭМС является главный электропривод блюминга 1300 со следующими параметрами: $K_{TP} = 86$, $T_m = 0,004 \text{ с}$, $R_s = 6,076 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$, $L_s = 4,97 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$, $T_s = 0,0816 \text{ с}$, $J = 9,5 \cdot 10^4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $C\Phi = 130 \text{ В}\cdot\text{с}$, $T_m = 0,034 \text{ с}$, $m = T_m/T_s = 0,417$, $U_n = 850 \text{ В}$, $I_n = 8460 \text{ А}$, $\omega_n = 6,28/9,42 \text{ с}^{-1}$, $M_n = 1,08 \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Для данного электропривода при жесткости механической характеристики двигателя $\beta = 2,78 \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ зададимся критическим значением $\beta_{c,kr} = -4 \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, при котором параметр $b = \beta_{c,kr}/\beta = -1,44$. Принятое значение $\beta_{c,kr}$ приводит к механической постоянной времени $T_c = J/\beta_{c,kr} = 0,0237 \text{ с}$, что вызывает уменьшение параметра m до $m = T_c/T_s = 0,29$.

Для компенсации влияния ЭДС двигателя в цепи обратной связи по току установлено динамическое звено пропорционально-дифференцирующего действия с передаточной функцией

$$G_k(p) = K_1 \frac{Tp + 1}{T_s p + 1}; \quad K_1 = 1 - \frac{2T_\mu}{T_c};$$

$$T = \frac{T_c T_s - (2T_\mu)^2/2}{T_c - 2T_\mu},$$

в котором в отличие от [11] электромеханическая постоянная времени T_m заменена механической постоянной времени T_c .

Следуя методике расчета СПР, примем: $U_{3C} = 10 \text{ В}$, $K_{DT} = 5,81 \cdot 10^{-4} \text{ В/А}$, $K_{DC} = 1,59 \text{ В}\cdot\text{с}$, $U_{orgI} = \pm 10,32 \text{ В}$, $K_{PT} = 1,24$, $K_1 = 0,663$, $T = 0,121 \text{ с}$, $K_0 = 0,0889$, $t_{разг} = 1 \text{ с}$.

Для создаваемой СПР с астатизмом $v=1$ при ее настройке с использованием биномиального распределения принято $T_0 = 2T_\mu = 0,008 \text{ с}$ ($\omega_0 = 125 \text{ с}^{-1}$) и определены по (11) значения коэффициентов полиномов $M(p)$ и $N(p)$:

$$m_{01} = 1; \quad m_{11} = 0,033; \quad n_{01} = 9,013 \cdot 10^{-3}; \\ n_{11} = 2,16 \cdot 10^{-5}.$$

При этом для постоянных времени и коэффициента усиления передаточной функции РС (12) найдено: $T_1 = 0,033 \text{ с}$; $T_2 = 9,013 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $T_{31} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $K_{pc1} = 11,25$.

На рис.4 приведены осциллограммы, полученные в результате компьютерных исследований данной ЭМС. На осциллограммах рис.4,а,б показаны переходные характеристики по управлению и возмущению, которые сопровождаются увеличением колебательности при уменьшении значения $\beta_{c,kr}$ по отношению к расчетному. Осциллограммы на рис.4,в,г подтверждают работоспособность системы при неизменных параметрах РС как на падающем, так и на восходящем участках механической характеристики нагрузки со значением $\beta_c = \pm 4 \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$. Система имеет удовлетворительное качество переходных процессов при следующих варьируемых значениях β_c и M_{c0} , входящих в общую нагрузку электропривода $M_c = M_{c0} \pm \beta_c \omega$:

$\beta_c = 0$, $M_{c0} = 0$, что соответствует разгону на холостом ходу — случай рис.4,д;

$\beta_{c,kr} = -4 \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, $M_{c0} = M_n$, что отвечает разгону под нагрузкой — случай рис.4,е;

$\beta_c = 0$, $M_{c0} = M_n$, что характеризует действие постоянного момента статического сопротивления — случай рис.4,ж;

$\beta_c = 1,75 \cdot 10^5$, $M_{c0} = M_n$, что подтверждает работоспособность ЭМС и с восходящим участком механической характеристики нагрузки — случай рис.4,з.

Анализ полученных результатов показывает не только эффективность синтезированного РС, но и компенсирующее влияние ЭДС двигателя пропорционально-дифференцирующего звена, установленного в цепи обратной связи по току.

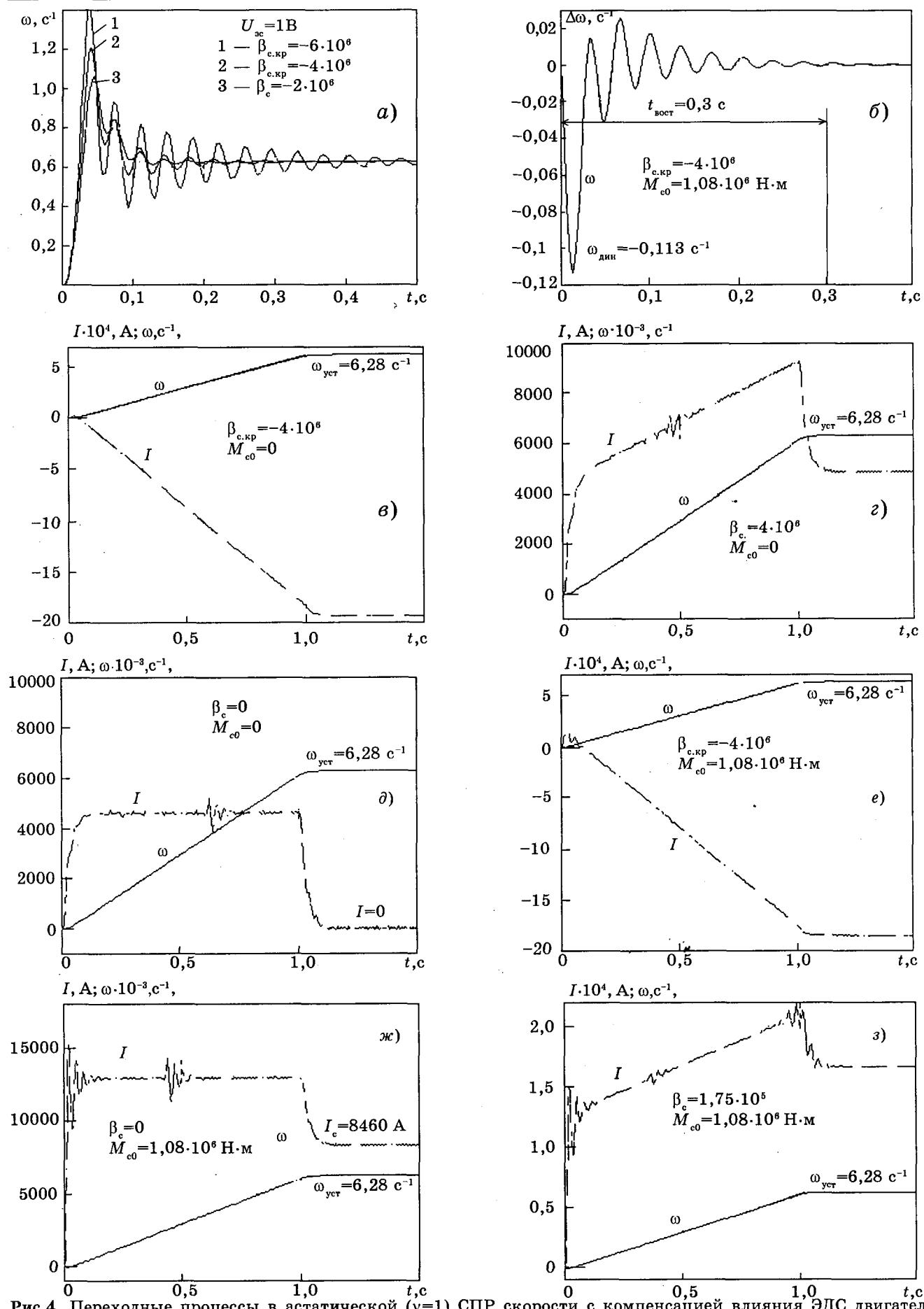


Рис.4. Переходные процессы в астатической ($v=1$) СПР скорости с компенсацией влияния ЭДС двигателя и настройке на биноминальное распределение

Выходы

1. Показано использование метода полиномиальных уравнений для синтеза передаточной функции РС системы подчиненного регулирования скорости электропривода с одномассовой механической частью, работающей при критических значениях жесткости падающего участка механической характеристики нагрузки, приводящих к исходно неустойчивому объекту управления.

2. Доказано, что для данного класса электроприводов при создании более быстродействующей статической системы регулирования скорости необходимо использовать ПД-РС, а для СПР с астатизмом первого порядка — ПИД-РС. В обоих случаях на выходе РС должен быть установлен фильтр с соответствующими параметрами.

3. Найдены выражения ошибок по управляющему и возмущающему воздействиям в СПР с астатизмом нулевого порядка для электропривода с падающим участком механической характеристики нагрузки.

4. По результатам компьютерных исследований установлено, что при синтезированных передаточных функциях РС СПР сохраняет требуемое качество переходных процессов при любом значении параметра $m = T_c/T_a$ и широком изменении коэффициента ОВТ β_c и, более того, сохраняет работоспособность на восходящем участке механической характеристики нагрузки.

5. При синтезе РС следует отдать предпочтение биномиальному распределению корней, обеспечивающему параметры регулятора, способствующие снижению колебательности переходных процессов в электроприводе.

Список литературы

- Гейлер Л.Б. Электропривод в тяжелом машиностроении. М.: Машигиз, 1958.
- Клепиков В.Б. О фрикционных колебаниях в электроприводе //Электричество. 1989. №4. С.59—62.
- Клепиков В.Б., Осичев А.В. Определение границ устойчивости электропривода с отрицательным вязким трением и учетом упругости кинематической цепи //Электричество. 1989. №7.

4. Осичев А.В. Проблемы управления электромеханическими системами с отрицательным вязким трением//Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Харьков: Основа, 1997. С.32—33.

5. Акимов Л.В., Клепиков В.Б. Синтез системы модального управления упругой ЭМС при нагрузке типа пара трения с улучшенными динамическими показателями//Автоматизированные электромеханические системы с модальными регуляторами и наблюдателями состояния. Харьков: ХГПУ, 1997. С.4—11.

6. Клепиков В.Б., Осичев А.В., Абдельмалик Д.С. Корневой метод синтеза ПИ-регуляторов скорости и тока одномассовой системы подчиненного регулирования с нагрузкой типа линейного вязкого трения//Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Харьков: Основа, 1997. С.299—302.

7. Абдельмалик Д.С. Улучшение динамических свойств электромеханических систем с подчиненным регулированием и отрицательным вязким трением настройкой их контуров. Дис... канд. техн. наук. Харьков: ХГПУ, 1998.

8. Залялеев С.Р. О применении метода полиномиальных уравнений для синтеза непрерывных систем электропривода//Электротехника. 1998. №2. С.48—53.

9. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972.

10. Красовский А.А., Поспелов Г.С. Основы автоматики и технической кибернетики. М.: Госэнергоиздат, 1962.

11. Шевелев Н.В. Уточненный расчет контура тока в системе регулирования скорости двигателя//Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок. ГПИ Тяжпромэлектропроект, 1967. №11. С.3—5.



Акимов Леонид Владимирович — профессор кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» Харьковского государственного политехнического университета (ХГПУ). Закончил электромашиностроительный факультет Харьковского политехнического института (ныне ХГПУ) в 1961 г.

В 1989 г. защитил докторскую диссертацию по теме: «Теория, алгоритмизация проектирования и создание оптимальных по быстродействию электроприводов при ограничениях координат и идеализированном управлении» в МЭИ.



Колотило Виталий Иванович — аспирант кафедры «Автоматизированные электромеханические системы» ХГПУ. Закончил электромашиностроительный факультет ХГПУ в 1996 г.

Синтез наблюдателей состояния для статической СПР скорости неустойчивого, под влиянием отрицательного вязкого трения, объекта

Л.В.АКИМОВ, доктор техн.наук, проф., В.И.КОЛОТИЛО, инж.

Харьковский государственный политехнический университет

Синтезированы наблюдатели состояния полного и пониженного порядков с полностью и неполностью управляемыми полюсами для статической системы подчиненного регулирования неустойчивого одномассового объекта с пропорционально-дифференциальным регулятором скорости, включение которых в цепь обратной связи приводит к появлению астатизма по управлению и возмущению, не влияя на быстродействие исходной структуры. Даны аналитические зависимости для коэффициентов коррекции в наблюдателях и проведен анализ результатов исследования предложенных систем на математических моделях.

В табл.1 дана сравнительная характеристика динамических показателей, синтезированных в [1] с использованием биномиального распределения корней, астатической ($v = 1$) и статической ($v = 0$) систем подчиненного регулирования (СПР) скорости неустойчивого, под влиянием критических значений коэффициента отрицательного вязкого трения (ОВТ) $\beta_{c,kr} < 0$, объекта. Этим объектом является электропривод постоянного тока, выполненный по системе тиристорный преобразователь — двигатель, характер нагрузки M_c , которого подчиняется зависимости $M_c = M_{c0} \pm \beta_c \omega$, $M_{c0} = \text{const}$. Для оценки систем использованы показатели, имеющие следующие обозначения: t_{01} — время первого согласования, с; t_{m1} — время первого максимума, с; μ — степень колебательности, представляемая здесь числом колебаний переходной характеристики; σ — перерегулирование, %; t_{per} — время регулирования, с; $\Delta\omega_{cr}$; $\Delta\omega_{din}$ — статическая и динамическая ошибки, с^{-1} ; t_{rest} — время восстановления скорости ω при ударном действии момента нагрузки M_{c0} , с; $\Delta\omega_u$ — ошибка по управлению для статической системы, с^{-1} ; $t_{\Delta\omega_{din}}$ — время наступления максимума динамической ошибки, с.

Анализ приведенных в табл.1 результатов показывает, что практически при одном

и том же значении среднегеометрического корня, находящегося в пределах $88,5 \text{ с}^{-1} < \omega_{0v} < 125 \text{ с}^{-1}$; $v = 0,1$, процессы в астатической СПР скорости ($\omega_n = 157 \text{ с}^{-1}$) даже с учетом фильтра на ее входе сопровождаются недопустимым перерегулированием $\sigma_1 = 65,3\%$, имеют большие число колебаний $\mu_1 = 8$ и время регулирования при скачке задания скорости $U_{ac} = 1 \text{ В}$, равное $t_{per1} = 0,15 \text{ с}$. В связи с этим, используя идеи, изложенные в [2], предлагается дополнить статическую СПР для неустойчивого объекта наблюдателями состояния (НС), чтобы придать ей астатические свойства по управляющему и возмущающему воздействиям за счет замены обратных связей по фактическим току I и скорости двигателя ω их восстановленными значениями \hat{I} , $\hat{\omega}$. При этом, как будет видно из дальнейшего, удается ликвидировать ошибки по управляющему $\Delta\omega_u$ и возмущающему $\Delta\omega_{cr}$ воздействиям, сохраняя неизменными малые значения перерегулирования $\sigma_0 = 8,3\%$, число колебаний $\mu_0 = 2$ и время регулирования $t_{per0} = 0,08 \text{ с}$, что способствует увеличению быстродействия при одновременном улучшении качества управления.

Целью работы является синтез различных легко реализуемых наблюдателей состояния полного (n) и пониженного ($n-j$) порядков с

Таблица 1

Система	t_{01} , с	t_{m1} , с	μ	$\sigma, \%$	t_{per} , с	$\Delta\omega_{cr}, \text{с}^{-1}$	$\Delta\omega_{din}, \text{с}^{-1}$	t_{rest} , с	$t_{\Delta\omega_{din}}$, с	$\Delta\omega_u, \text{с}^{-1}$
астатическая $v = 1$	0,0125	0,025	8	65,3	0,15	0	0,45	0,15	0,02	0
статическая $v = 0$	0,025	0,035	2	8,3	0,08	0,882	0,95	—	0,035	0,0838

полностью или частично управляемыми полюсами их характеристических полиномов для статической СПР скорости неустойчивого объекта, что способствует ликвидации в ней статических ошибок при сохранении повышенного быстродействия в отработке управляющего и возмущающего воздействий за счет замыкания обратными связями через наблюдатель.

Синтез наблюдателя НС4 полного порядка с одним неуправляемым полюсом

В верхней части рис.1 с учетом пунктира представлена синтезированная в [1] статическая ($v = 0$) СПР скорости неустойчивого объекта. Легко видеть, что данная система имеет полный порядок $n = 5$ и может быть представлена в пространстве состояния вектором переменных $\mathbf{X}_5 = [U_A \ U_{\text{ит}} \ U_d \ I\omega]^T$, где U_A и $U_{\text{ит}}$ — искусственно введенные координаты выхода апериодической и интегрирующей частей соответственно регуляторов скорости (РС) и тока (РТ).

С целью уменьшения коэффициентов корректирующих связей в НС и упрощения его структуры пренебрежем быстрыми движениями, обусловливающимися малой инерционностью T_{μ} тиристорного преобразователя. В связи с этим введем в рассмотрение вектор переменных состояния $\mathbf{X}_4 = [U_A \ U_{\text{ит}} \ I\omega]^T$ и примем $U_d = K_{\text{TP}} U_{\text{PT}}$. С учетом сказан-

ного исходная СПР с $v = 0$ в пространстве состояния может быть представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{U}}_A &= -\frac{1}{T_3} U_A - \frac{K_1 K_{\text{PC}} K_{\text{DC}}}{T_3} \omega + \frac{K_1 K_{\text{PC}}}{T_3} U_{3c}; \\
K_1 &= 1 - \frac{2T_{\mu}}{T_3}; \\
\dot{\mathbf{U}}_{\text{IT}} &= \frac{K_{\text{PT}}}{T_3} U_A - \frac{K_{\text{PT}} K_{\text{DT}}}{T_3} I - \\
&\quad - \frac{2T_{\mu} K_{\text{PC}} K_{\text{PT}} K_{\text{DC}}}{T_3 T_3} \omega + \frac{2T_{\mu} K_{\text{PC}} K_{\text{PT}}}{T_3 T_3} U_{3c}; \\
\dot{\mathbf{I}} &= -\frac{K_{\text{PT}} K_{\text{TP}}}{L_3} U_A + \frac{K_{\text{TP}}}{L_3} U_{\text{IT}} - \left(\frac{K_{\text{TP}} K_{\text{PT}} K_{\text{DT}}}{L_3} + \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{T_3} \right) I - \left(\frac{K_{\text{TP}} K_{\text{PT}} 2T_{\mu} K_{\text{PC}} K_{\text{DC}}}{L_3 T_3} + \frac{C\Phi}{L_3} \right) \omega + \\
&\quad + \frac{K_{\text{TP}} K_{\text{PT}} 2T_{\mu} K_{\text{PC}}}{L_3 T_3} U_{3c}; \\
\dot{\omega} &= \frac{C\Phi}{J} I \pm \frac{\beta_e}{J} \omega - \frac{1}{J} M_e.
\end{aligned} \tag{1}$$

В соответствии с матричными уравнениями

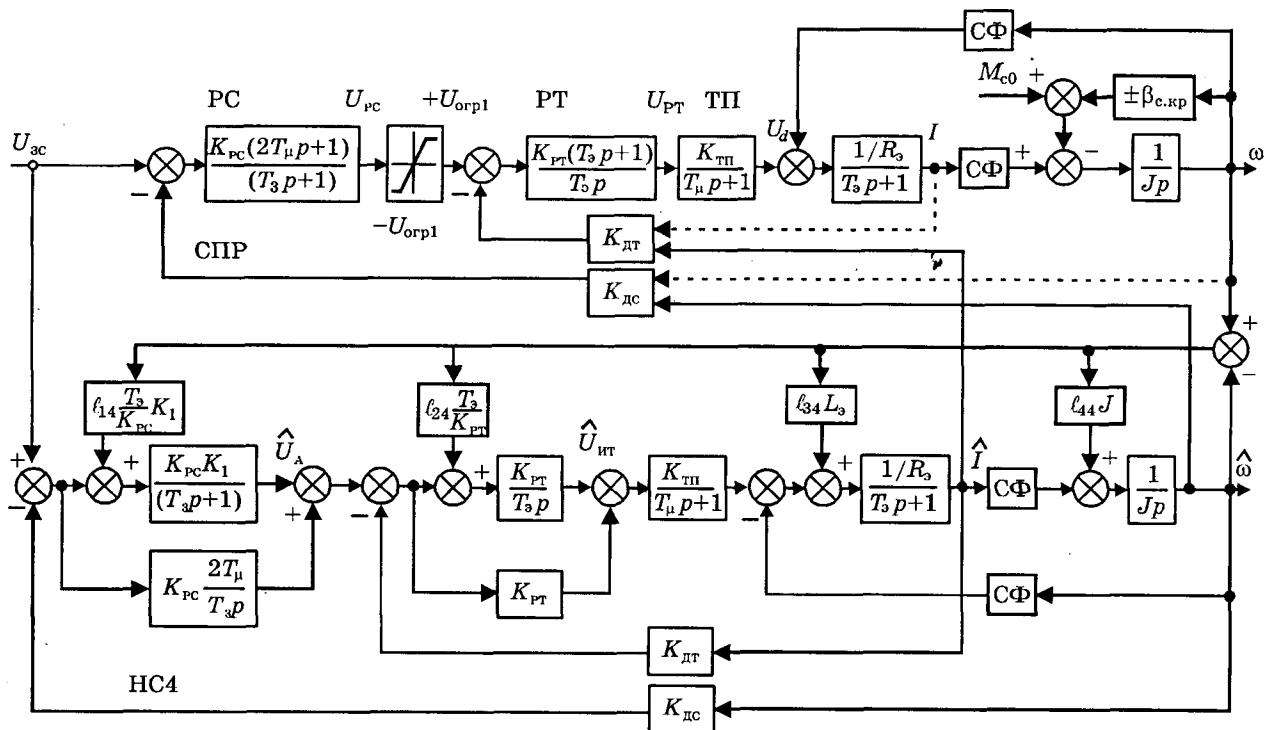


Рис.1. СПР скорости, замкнутая через наблюдатель полного порядка НС4 с неполностью управляемыми полюсами и влиянием ОВТ

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{AX} + \mathbf{B}_u \mathbf{U} + \mathbf{B}_m \mathbf{M}_c; \quad \mathbf{Y} = \mathbf{CX} \quad (2)$$

запишем матрицы состояния \mathbf{A} , управления \mathbf{B}_u , возмущения \mathbf{B}_m и выхода \mathbf{C} , имеющие вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_3} & 0 & 0 \\ \frac{K_{PT}}{T_3} & 0 & -\frac{K_{PT}K_{DT}}{T_3} \\ \frac{K_{PT}K_{TP}}{L_3} & \frac{K_{TP}}{L_3} & -\left(\frac{K_{TP}K_{PT}K_{DT}}{L_3} + \frac{1}{T_3}\right) \\ 0 & 0 & \frac{C\Phi}{J} \end{bmatrix},$$

$$-\left(\frac{K_{TP}K_{PT}2T_\mu K_{PC}K_{DC}}{L_3T_3} + \frac{C\Phi}{L_3}\right);$$

$$\pm \frac{\beta_c}{J}$$

$$\mathbf{B}_u = \begin{bmatrix} \frac{K_1K_{PC}}{T_3} \\ \frac{2T_\mu K_{PC}K_{PT}}{T_3T_3} \\ \frac{K_{TP}K_{PT}2T_\mu K_{PC}}{L_3T_3} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix}^T; \quad \mathbf{C} = [0 \ 0 \ 0 \ 1]. \quad (3)$$

Для синтеза НС5-1 = НС4 полного порядка ($n = 5$) с одним неуправляемым корнем ($j = 1$) введем матрицу модальной обратной связи в наблюдателе $\mathbf{L}_4 = [\ell_{14} \ \ell_{24} \ \ell_{34} \ \ell_{44}]^T$ и в соответствии с методикой [3] определим его характеристический полином

$$H_4(p) = \det(pI - \mathbf{A} + \mathbf{L}_4 \mathbf{C}) =$$

$$\begin{bmatrix} p + \frac{1}{T_3} & 0 & 0 \\ -\frac{K_{PT}}{T_3} & p & \frac{K_{PT}K_{DT}}{T_3} \\ -\frac{K_{PT}K_{TP}}{L_3} & -\frac{K_{TP}}{L_3} & p + \frac{K_{TP}K_{PT}K_{DT}}{L_3} + \frac{1}{T_3} \\ 0 & 0 & \frac{C\Phi}{J} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} & \frac{K_1K_{PC}K_{DC}}{T_3} + \ell_{14} \\ & \frac{2T_\mu K_{PC}K_{DC}K_{PT}}{T_3T_3} + \ell_{24} \\ & \frac{K_{TP}K_{PT}2T_\mu K_{PC}K_{DC}}{L_3T_3} + \frac{C\Phi}{L_3} + \ell_{34} \\ & p + \ell_{44} \pm \frac{\beta_c}{J} \end{aligned} =$$

$$= p^4 + p^3 \left(\ell_{44} \mp \frac{\beta_c}{J} + \frac{K_{TP}K_{PT}K_{DT}}{L_3} + \frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_3} \right) +$$

$$+ p^2 \left[\left(\ell_{44} \mp \frac{\beta_c}{J} \right) \left(\frac{K_{TP}K_{PT}K_{DT}}{L_3} + \frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_3} \right) + \frac{C\Phi}{J} \ell_{34} + \right. \\ + \frac{K_{TP}K_{PT}2T_\mu K_{PC}K_{DC}(C\Phi)}{L_3T_3J} + \frac{(C\Phi)^2}{JL_3} + \frac{1}{T_3T_3} + \\ \left. + \frac{K_{TP}K_{PT}K_{DT}(T_3 + T_3)}{L_3T_3} \right] + p \left[\left(\ell_{44} \mp \frac{\beta_c}{J} \right) \times \right. \\ \times \left(\frac{K_{TP}K_{PT}K_{DT}(T_3 + T_3)}{L_3T_3T_3} + \frac{1}{T_3T_3} \right) + \ell_{34} \frac{C\Phi}{JT_3} + \\ + \ell_{24} \frac{K_{TP}(C\Phi)}{L_3J} + \ell_{14} \frac{K_{PT}K_{TP}(C\Phi)}{L_3J} + \\ + \frac{K_1K_{PC}K_{DC}K_{PT}K_{TP}(C\Phi)}{L_3JT_3} + \frac{4T_\mu K_{TP}K_{PT}K_{PC}K_{DC}(C\Phi)}{L_3JT_3T_3} + \\ + \frac{(C\Phi)^2}{JL_3T_3} + \frac{K_{TP}K_{PT}K_{DT}}{L_3T_3T_3} \left. \right] + \left[\left(\ell_{44} \mp \frac{\beta_c}{J} \right) \times \right. \\ \times \frac{K_{TP}K_{PT}K_{DT}}{L_3T_3T_3} + \ell_{24} \frac{K_{TP}(C\Phi)}{L_3JT_3} + \ell_{14} \frac{K_{PT}K_{TP}(C\Phi)}{L_3JT_3} + \\ + \frac{K_{TP}(C\Phi)2T_\mu K_{PC}K_{DC}K_{PT}}{L_3JT_3T_3^2} + \frac{K_{TP}(C\Phi)2T_\mu K_{PC}K_{DC}K_{PT}}{L_3JT_3T_3^2} + \\ \left. + \frac{K_1K_{PC}K_{DC}K_{PT}K_{TP}(C\Phi)}{L_3JT_3T_3} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Придадим НС4 желаемые динамические свойства, задавшись биномиальной формой распределения полюсов четвертого порядка вида [4]:

$$H_{4ж}(p) = p^4 + 4\omega_{0H}p^3 + 6\omega_{0H}^2p^2 + 4\omega_{0H}^3p + \omega_{0H}^4, \quad (5)$$

где ω_{0H} , c^{-1} — среднегеометрический корень НС4, принимаемый равным

$$\omega_{0n} = K\omega_{0v}, K \in [2 \div 5]. \quad (6)$$

Из сравнения коэффициентов при одинаковых степенях p уравнений (4) и (5), а также с учетом того

$$K_{PT} = \frac{L_s}{2T_\mu K_{TP} K_{DT}}, \quad K_{PC} = \frac{m_{02}}{n_{02} K_0};$$

$$K_0 = \frac{K_{DC}(C\Phi)}{\beta_{c,kp} K_{DT}}; \quad \Omega_{0dv}^2 = \frac{(C\Phi)^2}{JL_s},$$

найдены аналитические выражения для коэффициентов корректирующих обратных связей матрицы L_4 :

$$\ell_{14} = \frac{2T_\mu T_s JK_{DT}}{(C\Phi)} \left[\omega_{0n}^4 - \frac{m_{02}}{n_{02} T_3 T_s T_c 2T_\mu} - \frac{K_{TP}(C\Phi)}{L_s J T_3} \ell_{24} - \left(\ell_4 \mp \frac{\beta_c}{J} \right) \frac{1}{2T_\mu T_s T_3} \right]; \quad (7)$$

$$\ell_{24} = \frac{JL_s}{K_{TP}(C\Phi) \left(1 - \frac{T_s}{T_3} \right)} \left[4\omega_{0n}^3 - T_s \omega_{0n}^4 - \frac{\Omega_{0dv}^2}{T_3} - \frac{1}{2T_\mu T_s T_3} - \frac{m_{02}(2T_3 - T_s)}{n_{02} T_s^2 T_s T_c} - \ell_{34} \frac{(C\Phi)}{J T_3} - \left(\ell_4 \mp \frac{\beta_c}{J} \right) \left(\frac{1}{T_s T_3} + \frac{1}{2T_\mu T_s} \right) \right]; \quad (8)$$

$$\ell_{34} = \frac{J}{(C\Phi)} \left[6\omega_{0n}^2 - \Omega_{0dv}^2 - \frac{1}{T_s T_3} \left(1 + \frac{T_s + T_3}{2T_\mu} \right) - \frac{m_{02}}{n_{02} T_s T_c} - \left(\ell_4 \mp \frac{\beta_c}{J} \right) \left(\frac{1}{2T_\mu} + \frac{T_3 + T_s}{T_s T_3} \right) \right]; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \ell_{44} &= 4\omega_{0n} - \frac{T_3 + T_s}{T_s T_3} - \frac{1}{2T_\mu} \pm \frac{\beta_c}{J} = \\ &= 4\omega_{0n} - \frac{T_3 + T_s}{T_s T_3} - \frac{1}{2T_\mu} \pm \frac{1}{T_c}. \end{aligned} \quad (10)$$

Из полученных соотношений (7)–(10) можно видеть несущественное влияние коэффициента вязкого трения любого знака на значения коэффициентов матрицы L_4 , которое, к тому же, может быть дополнительно ослаблено соответствующим выбором величины среднегеометрического корня НС4 ω_{0n} . В связи с этим представим НС4 в развер-

нутой матричной форме без учета β_c в характере нагрузки

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{U}}_A \\ \hat{\mathbf{U}}_{IT} \\ \hat{\mathbf{I}} \\ \hat{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_3} & 0 & 0 \\ \frac{K_{PT}}{T_s} & 0 & -\frac{K_{PT} K_{DT}}{T_s} \\ \frac{K_{PT} K_{TP}}{L_s} & \frac{K_{TP}}{L_s} & -\left(\frac{K_{TP} K_{PT} K_{DT}}{L_s} + \frac{1}{T_s} \right) \\ 0 & 0 & \frac{C\Phi}{J} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{K_1 K_{PC} K_{DC}}{T_3} - \ell_{14} \\ -\frac{2T_\mu K_{PC} K_{DC} K_{PT}}{T_s T_3} - \ell_{24} \\ -\left(\frac{K_{TP} K_{PT} 2T_\mu K_{PC} K_{DC}}{L_s T_3} + \frac{C\Phi}{L_s} \right) - \ell_{34} \\ -\ell_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{U}}_A \\ \hat{\mathbf{U}}_{IT} \\ \hat{\mathbf{I}} \\ \hat{\omega} \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} \ell_{14} \\ \ell_{24} \\ \ell_{34} \\ \ell_{44} \end{bmatrix} \omega(t) + \begin{bmatrix} \frac{K_1 K_{PC}}{T_3} \\ -\frac{2T_\mu K_{PC} K_{PT}}{T_s T_3} \\ \frac{K_{TP} K_{PT} 2T_\mu K_{PC}}{L_s T_3} \\ 0 \end{bmatrix} U_{3C}(t). \quad (11)$$

На основании уравнения (11) в нижней части рис.1 представлена структурная схема НС4 для СПР с ПД–РС и фильтром на его выходе для неустойчивого объекта и показаны обратные связи по току $\hat{\mathbf{I}}$ и скорости $\hat{\omega}$, заведенные в исходную систему от наблюдателя.

Определим итерационные свойства [5] синтезированной двухканальной структуры по управляющему U_{3C} и возмущающему M_{e0} воздействиям.

Известно [6], что необходимым и достаточным условием астатизма системы по отношению к управляющему и возмущающему воздействиям является астатизм обратной связи, который определяет порядок астатизма системы в целом. Выбранная для синтеза НС4 стандартная форма в виде биномиального распределения (5) имеет порядок астатизма $v_{HC} = 1$, так как в разомкну-

том состоянии наблюдатель может быть представлен передаточной функцией [7]

$$W(p) = \frac{\omega_{0n}^4}{p^4 + 4\omega_{0n}p^3 + 6\omega_{0n}^2p + 4\omega_{0n}^3}.$$

Исходя из этого, для астатизма v_{Σ} СПР с НС4 получим $v_{\Sigma} = v + v_{\text{НС4}} = 0 + 1 = 1$, что относится к случаю, когда объект является статическим, а регулятор, т.е. НС4 полного порядка, астатическим. При этом двухканальная система рис.1 с исходно статической СПР и астатическим наблюдателем состояния полного порядка приобретает астатические свойства по управлению и возмущению, которые не сказываются на высоком быстродействии, присущем исходной СПР с ПД—РС. Ранее установлено [8], что если структура и параметры стационарного объекта точно воспроизводятся НС, то введение обратных связей в исходную систему по восстановленным координатам \hat{X} эквивалентно ее замыканию по реальным координатам X . Поэтому собственная динамика НС при изменении управляющего воздействия не влияет на динамику, а следовательно, на быстродействие исходного объекта, замкнутого через него.

Синтез наблюдателя НС3 полного порядка с двумя неуправляемыми полюсами

Представим вектор переменных состояния X исходной СПР в виде $X = [U_{\text{ит}} I_{\omega}]^T$, для чего пренебрежем быстрыми движениями, обусловленными инерционностями как тиристорного преобразователя T_{μ} , так и РС T_3 . Кроме того, условно опустим форссирующее звено в передаточной функции РС. Другими словами будем считать, что в качестве ТП и РС используются пропорциональные звенья с коэффициентами передачи $K_{\text{РС}}$ и $K_{\text{ТП}}$. Это сделано с целью дальнейшего упрощения реализации НС, в том числе и за счет уменьшения коэффициентов модальной обратной связи в наблюдателе, представляющей теперь матрицей $L_3 = [\ell_{13} \quad \ell_{23} \quad \ell_{33}]^T$. Отметим, что данный наблюдатель синтезируется как система третьего порядка $n-j = 5-2 = 3$, а поэтому обозначен НС3.

С учетом сказанного, исходная СПР, показанная в верхней части рис.1, в принятом пространстве состояния при пренебрежении $\pm\beta_c$ в характере нагрузки может быть представлена следующими матрицами:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_{\text{РТ}} K_{\text{ДТ}}}{T_3} \\ \frac{K_{\text{ТП}}}{L_3} & -\left(\frac{K_{\text{ТП}} K_{\text{РТ}} K_{\text{ДТ}}}{L_3} + \frac{1}{T_3}\right) \\ 0 & \frac{C\Phi}{J} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{K_{\text{РТ}} K_{\text{РС}} K_{\text{ДС}}}{T_3} \\ -\left(\frac{K_{\text{ТП}} K_{\text{РТ}} K_{\text{РС}} K_{\text{ДС}}}{L_3} + \frac{C\Phi}{L_3}\right) \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$B_u = \begin{bmatrix} \frac{K_{\text{РС}} K_{\text{РТ}}}{T_3} \\ \frac{K_{\text{ТП}} K_{\text{РТ}} K_{\text{РС}}}{L_3} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$B_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix}^T; \quad C = [0 \ 0 \ 1]. \quad (12)$$

При этом характеристический полином НС3 принимает вид

$$\begin{aligned} H_3(p) = p^3 + p^2 \left(\ell_{33} + \frac{1}{T_3} + \frac{K_{\text{ТП}} K_{\text{РТ}} K_{\text{ДТ}}}{L_3} \right) + \\ + p \left[\ell_{33} + \left(\frac{1}{T_3} + \frac{K_{\text{ТП}} K_{\text{РТ}} K_{\text{ДТ}}}{L_3} \right) + \ell_{23} \frac{C\Phi}{J} + \Omega_{0\text{дв}}^2 + \right. \\ \left. + \frac{K_{\text{ТП}} K_{\text{РТ}} K_{\text{ДТ}}}{L_3 T_3} + \frac{K_{\text{ТП}} K_{\text{РТ}} K_{\text{РС}} K_{\text{ДС}} (C\Phi)}{L_3 J} \right] + \\ + \left[\ell_{33} \frac{K_{\text{ТП}} K_{\text{РТ}} K_{\text{ДТ}}}{L_3 T_3} + \ell_{13} \frac{K_{\text{ТП}} (C\Phi)}{L_3 J} + \right. \\ \left. + \frac{K_{\text{ТП}} K_{\text{РТ}} K_{\text{РС}} K_{\text{ДС}} (C\Phi)}{L_3 T_3 J} \right]. \quad (13) \end{aligned}$$

Как и в предыдущем случае, зададимся биномиальной формой распределения, теперь уже третьего порядка [4]

$$H_{3\text{ж}}(p) = p^3 + 3\omega_{0n}p^2 + 3\omega_{0n}^2p + \omega_{0n}^3, \quad (14)$$

и из сравнения соответствующих коэффи-

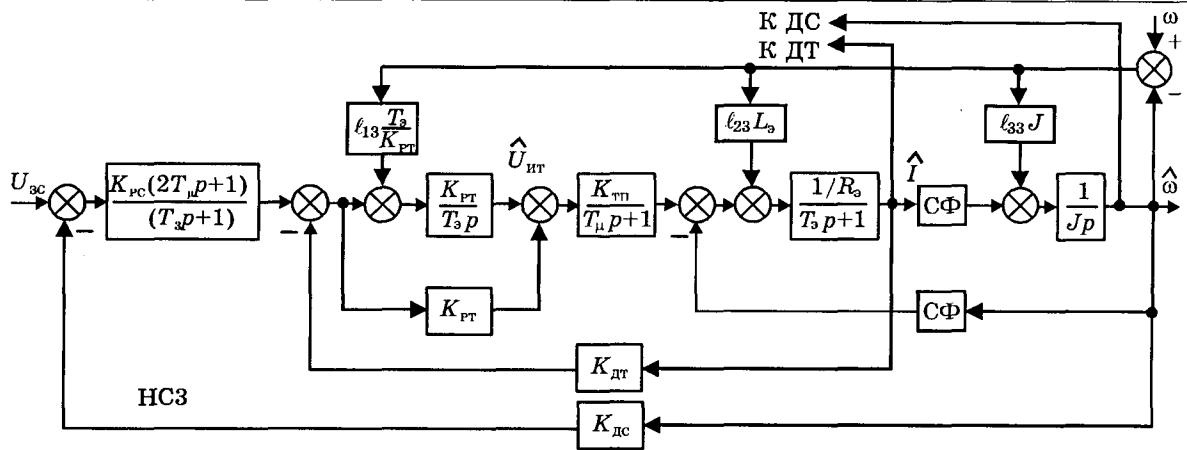


Рис.2. Наблюдатель полного порядка НС3 с неполностью управляемыми полюсами

циентов (13) и (14) определим с учетом значений коэффициентов K_{PT} , K_{PC} , K_0 аналитические выражения для составляющих матрицы L_3 в виде:

$$\ell_{13} = \frac{JL_3}{K_{T_{\Pi}}(C\Phi)} \left(\omega_{0_{\text{H}}}^3 - \frac{m_{02}}{n_{02}T_sT_c} - \ell_{33} \frac{1}{2T_{\mu}T_3} \right); \quad (15)$$

$$\ell_{23} = \frac{J}{(C\Phi)} \times \\ \times \left(3\omega_{0_{\text{H}}}^2 - \Omega_{0_{\text{дв}}}^2 - \frac{1}{2T_{\mu}T_{\text{a}}} - \frac{m_{02}}{n_{02}T_{\text{c}}} - \ell_{33} \frac{2T_{\mu} + T_{\text{a}}}{2T_{\mu}T_{\text{a}}} \right); \quad (16)$$

$$\ell_{33} = 3\omega_{0_H} - \frac{2T_u + T_e}{2T_u T_e} . \quad (17)$$

Следуя известному уравнению наблюдателя [3]

$$\hat{\mathbf{X}}(t) = (A - LC)\hat{\mathbf{X}} + LY(t) + B_u U(t),$$

на рис.2 представлена синтезированная структурная схема НС3, возможность использования которого взамен НС4 способствует не только сохранению указанных ранее итерационных свойств систем, замкнутых через наблюдатель полного порядка, но и приводит к упрощению его структуры и уменьшению коэффициентов модальной обратной связи в нем, что облегчает его создание на современной элементарной базе.

Наблюдатель пониженного порядка НС2 с полностью управляемыми полюсами

Синтез НС2, приведенного на рис.3, выполнен авторами в [9] и кроме того опубликован в [10]. Поэтому приведем здесь без доказательства зависимости для коэффициентов модальной обратной связи в нем L_2 :

$$\ell_{12} = \frac{J}{C\Phi} \left(\omega_{0_{\text{H}}}^2 - \Omega_{0_{\text{dB}}}^2 - \frac{1}{T_s} \left(\ell_{22} \mp \frac{1}{T_c} \right) \right);$$

$$\ell_{22} = 2\omega_{0\text{H}} - \frac{1}{T_a} \mp \frac{1}{T_c}; \quad T_c = \frac{1}{\beta_{c_{\text{kp}}}}. \quad (18)$$

Особенность НС2 заключается в том, что он при включении в состав исходной СПР не изменяет ее статизма как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям. В связи с этим представляет интерес определить влияние НС2 прежде всего на значение статической ошибки $\Delta\omega_{ct}$ по возмущению.

По полученной с помощью метода графов [11] передаточной функции СПР с НС2 по возмущению при $p \rightarrow 0$ найдено общее выражение для статической ошибки при условии, что существующие в механической части электропривода отрицательное вязкое трение, как и в предыдущих наблюдателях, не введено в его состав. Выражение для ошибки имеет вид

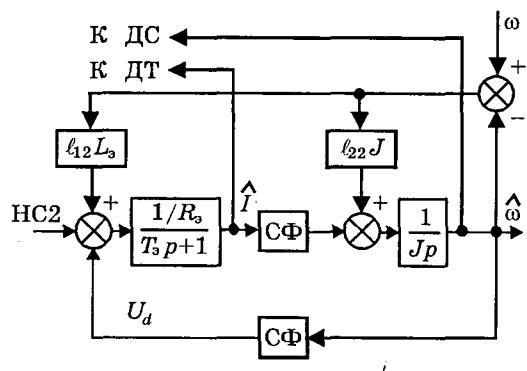


Рис.3. Наблюдатель пониженного порядка НС2 с полностью управляемыми полюсами

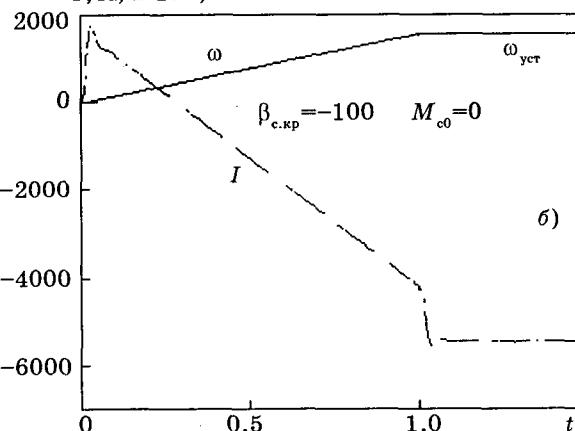
$$\Delta\omega_{ct} = - \frac{\left(\pm \beta_c + \ell_{22} J + \frac{K_{dc} K_{pc}}{K_{dt}} (C\Phi) \right) M_{c0}}{\left(\ell_{12} T_s (C\Phi) + \frac{1}{R_s} (C\Phi)^2 (\pm \beta_c) + \right.} \quad (19)$$

После подстановки в (19) значений ℓ_{12} , ℓ_{22} (18), а также K_{pc} , окончательно при $\beta_c = \beta_{c,kp} < 0$ найдено

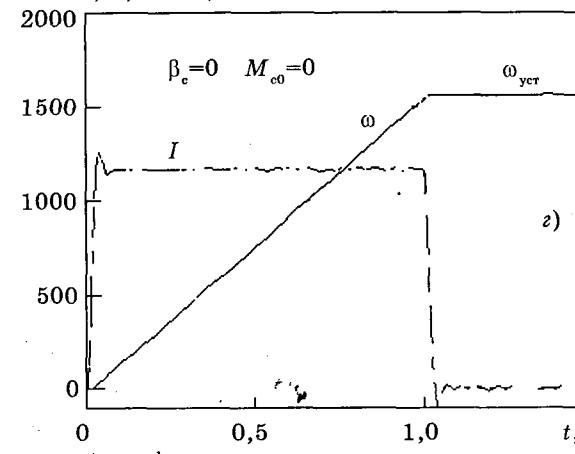
$$\Delta\omega_{ct} = - \frac{R_s I_{c0}}{C\Phi} \frac{\frac{m_{02}}{n_{02}} - \frac{T_c}{T_s} + 2(T_c \omega_{0H} - 1)}{\frac{\omega_{0H}^2}{\Omega_{0dB}^2} \left(1 + \frac{m_{02}}{n_{02}} \right) - \frac{T_m}{T_c} \frac{m_{02}}{n_{02}}} \quad (20)$$

$$\rightarrow \frac{\frac{T_m}{T_s} - 2(T_m \omega_{0H} + 1)}{\frac{T_m}{T_s}}, \quad (20)$$

$I, A; \omega \cdot 10^{-1}, \text{c}^{-1}$



$I, A; \omega \cdot 10^{-1}, \text{c}^{-1}$



$\Delta\omega, \text{c}^{-1}$

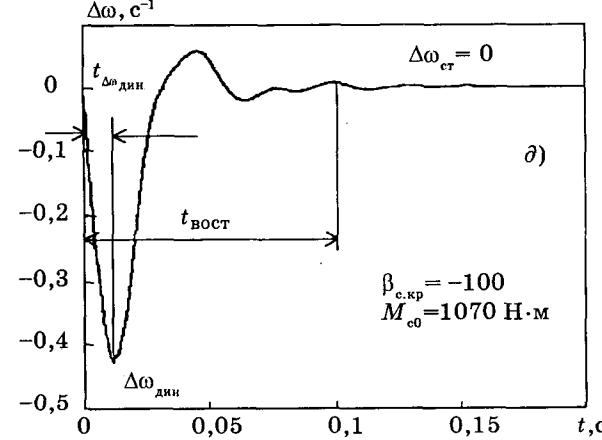
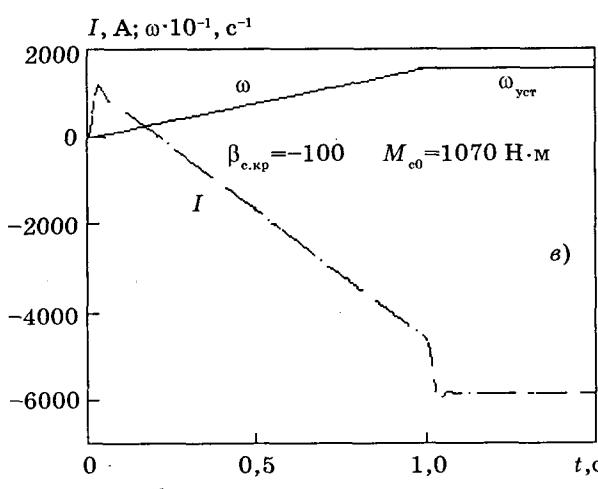
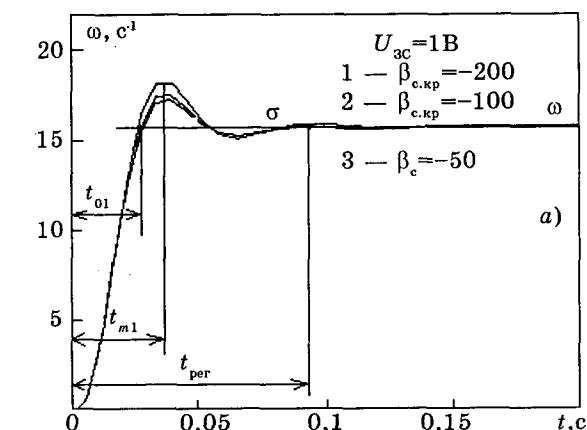
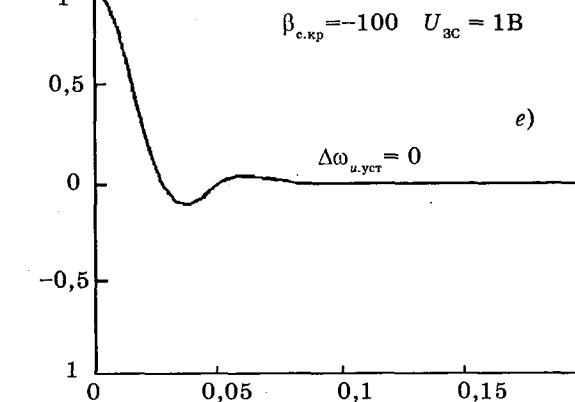


Рис.4. Переходные процессы в СПР скорости с НС4 либо НС3

где значения m_{02} и n_{02} берутся из [1]. Можно видеть, что наблюдатель НС2 приводит к существенному уменьшению статической ошибки при действии на вал двигателя постоянной составляющей M_{e0} нагрузки.

Компьютерные исследования СПР для неустойчивого объекта с синтезированными наблюдателями НС4, НС3 и НС2 проводились с помощью пакета MATLAB для электропривода с параметрами, указанными в [1] при номинальной скорости двигателя $\omega_n =$

$= 157 \text{ с}^{-1}$ и $\beta_{c,kp} = -100 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, $T_c = 0,2 \text{ с}$, $\Omega_{0,2}^2 = 52,2 \text{ с}^{-2}$, $\omega_{0v} = 88,5 \text{ с}^{-1}$. Для всех наблюдателей было выбрано одно значение среднегеометрического корня $\omega_{0n} = 500 \text{ с}^{-1}$ ($\omega_{0n} = 5\omega_{0v}$), при котором для коэффициентов матриц L , получены значения:

$$\text{НС4; } L_4; \quad \ell_{14} \frac{T_3}{K_{PC} K_1} = 2,2 \cdot 10^2; \quad \ell_{24} \frac{T_3}{K_{PT}} = \\ = 1,15 \cdot 10^4; \quad \ell_{34} L_3 = 5,18 \cdot 10^4; \quad \ell_{44} J = 3,46 \cdot 10^4;$$

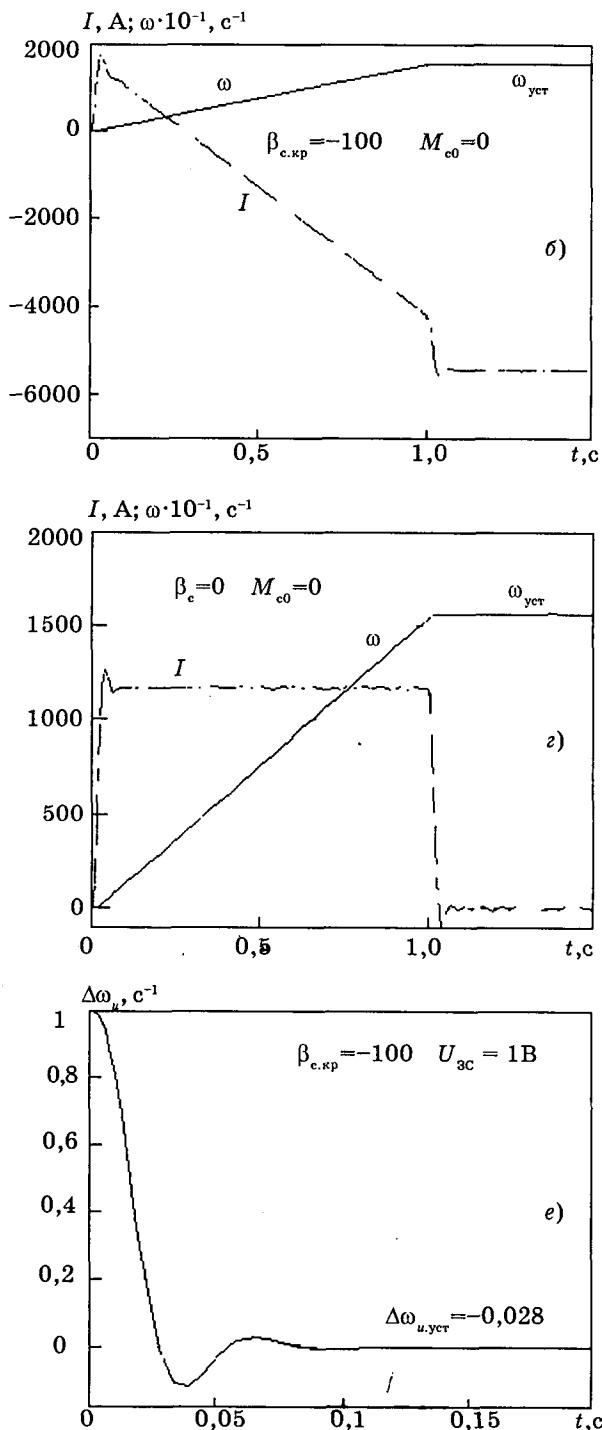
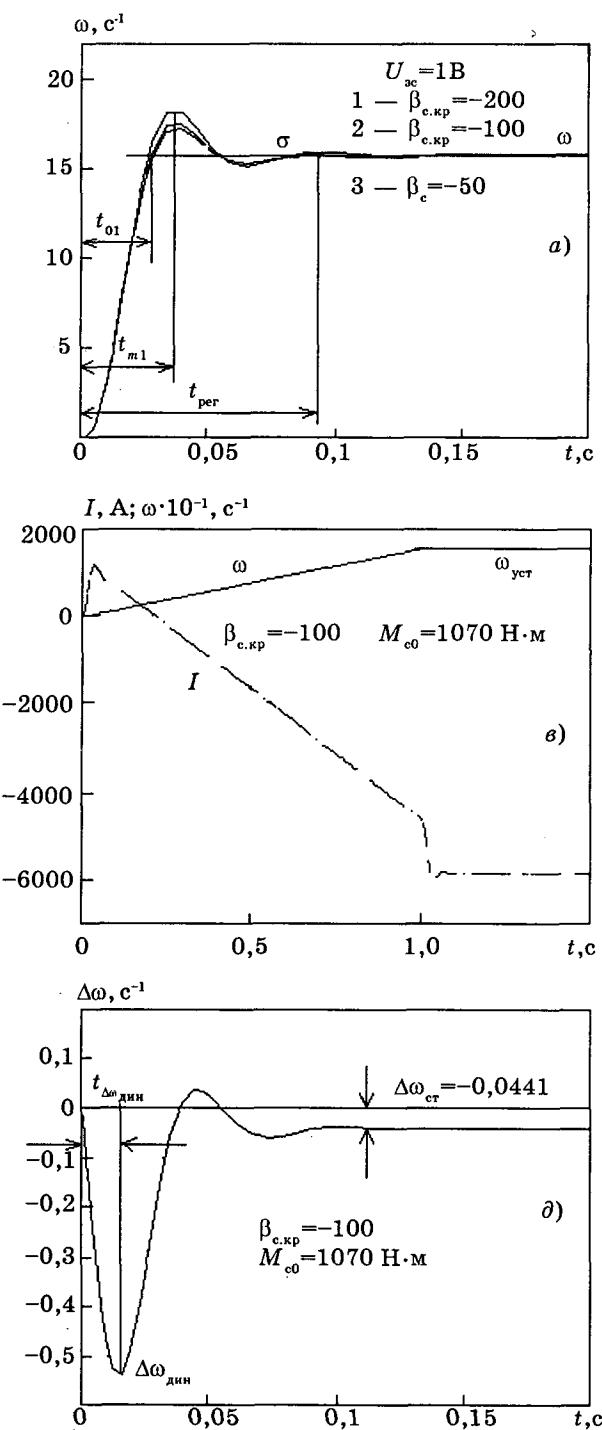


Рис.5. Переходные процессы в СПР скорости с НС2

Таблица 2

Система с $v = 0$ и НС	t_{01} , с	t_{m1} , с	μ	$\sigma, \%$	t_{per} , с	$\Delta\omega_{cr}, \text{с}^{-1}$	$\Delta\omega_{дин}, \text{с}^{-1}$	$t_{вост}$, с	$t_{\Delta\omega_{дин}}$, с	$\Delta\omega_u, \text{с}^{-1}$
НС4	0,025	0,035	2	8,3	0,08	0	0,415	0,1	0,012	0
НС3	0,025	0,035	2	8,3	0,08	0	0,45	0,1	0,012	0
НС2	0,025	0,035	2	8,3	0,08	0,0441	0,52	0,1	0,012	0,038

$$\text{НС3; } L_3; \quad \ell_{13} \frac{T_3}{K_{PT}} = 2,89 \cdot 10^3; \quad \ell_{23} L_3 = \\ = 2,84 \cdot 10^4; \quad \ell_{34} J = 2,72 \cdot 10^4; \\ \text{НС2; } L_2; \quad \ell_{12} L_3 = 1,22 \cdot 10^4; \quad \ell_{22} J = 1,97 \cdot 10^4.$$

На рис.4 показаны процессы в СПР с НС4, практически не отличающиеся от процессов в системе с НС3. Система с наблюдателями полного порядка приобрела астатизм $v_{\Sigma} = 1$ по управлению и возмущению, что отчетливо видно из переходных характеристик по управлению (рис.4,а), возмущению (рис.4,д) и ошибке $\Delta\omega_u$ (рис.4,е). При этом процессы управления (рис.4,б—г), связанные с действием на электропривод различных по характеру возмущений, остались соответствующими исходной СПР без НС. Они приведены в [1].

Процессы в СПР с НС2 иллюстрируются на рис.5. Их анализ показывает, что включение в состав СПР неустойчивого объекта наблюдателя пониженного порядка НС2 не изменяет ее статических свойств по управлению и возмущению, однако способствует существенному уменьшению статических ошибок, соответствующих полученной формуле (20).

Обобщенная сравнительная характеристика статических и динамических показателей СПР с НС дана в табл.2. Сопоставление результатов исследований, помещенных в табл.1 и 2, показывает, что наблюдатели полного порядка с неполностью управляемыми полюсами НС4 и НС3, имея практически одинаковые показатели качества переходных процессов, способствуют ликвидации статических ошибок в статической СПР скорости неустойчивого объекта, сохраняя присущее системе быстродействие, которое в два раза больше, чем в астатической СПР с ПИД—РС и $v = 1$, синтезированной в [1]. Наблюдатели НС4 и НС3 способствуют уменьшению перерегулирования в 7,9 раза и снижают в 1,5 раза время восстановления скорости двигателя после ударного приложения нагрузки M_{o0} . По всем показателям СПР с ПД-РС, дополненная наблюдате-

лем НС4 или НС3, оказывается лучше, чем астатическая СПР с ПИД—РС.

Наблюдатель состояния пониженного порядка НС2 с полностью управляемыми полюсами, не влияя на быстродействие исходной СПР с $v = 0$, приводит к уменьшению статических и динамической ошибок, что также является положительным в тех случаях, когда требуется некоторое смягчение характеристик электропривода, которое в СПР с традиционными регуляторами достигается применением ПИП—РС [12].

Полученные результаты убеждают в эффективности использования предложенных здесь наблюдателей состояния для улучшения статических и динамических характеристик электроприводов, отягченных влиянием отрицательного вязкого трения, включая случаи критических значений его коэффициента β_c .

Выводы

1. Синтезированы наблюдатели состояния полного порядка с неполностью управляемыми полюсами НС4, НС3 и показана эффективность их использования для придания астатических свойств исходно статической СПР скорости неустойчивого, под влиянием критических значений коэффициента отрицательного вязкого трения, объекта, что способствует ликвидации статических ошибок по управляющему и возмущающему воздействиям при сохранении быстродействия, соответствующего системе с ПД—РС.

2. Установлено, что наблюдатель пониженного порядка с полностью управляемыми полюсами НС2 при его включении в состав СПР с ПД—РС, обеспечивает существенное уменьшение статических и динамических ошибок и также не влияет на быстродействие исходной системы.

3. Наблюдатели с неполностью управляемыми полюсами и пониженного порядка имеют малые значения коэффициентов модальной обратной связи, что облегчает их реализацию.

4. Синтезированные структуры сохраняют устойчивость и необходимое качество переходных процессов при значительном изменении коэффициента вязкого трения β_c , вплоть до положительных значений.

Список литературы

1. Акимов Л.В., Колотило В.И. Синтез СПР скорости неустойчивого, под влиянием отрицательного вязкого трения, объекта методом полиномиальных уравнений//Электротехника. 1999. №3.
2. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Системы управления электроприводами постоянного тока с наблюдателями состояния. Харьков: ХГПУ, 1998.
3. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. С.-Пб.: Энергоатомиздат, 1992.
4. Красовский А.А., Поспелов Г.С. Основы автоматики и технической кибернетики. М.: Госэнергоиздат, 1962.
5. Осмоловский П.Ф. Итерационный принцип построения многоканальных систем автоматического управления// Доклады АН СССР. 1968. Т.181. №1. С.78—90.
6. Клюев А.С. Автоматическое регулирование. М.: Энергия, 1973.
7. Куропаткин П.В. Теория автоматического управления. М.: Высшая школа, 1973.
8. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 1982.
9. Автоматизированные электромеханические системы с модальными регуляторами и наблюдателями состояния/Под ред. В.Б.Клепикова, Л.В.Акимова. Харьков: ХГПУ, 1997.
10. Акимов Л.В., Колотило В.И. Формирование сигнала, пропорционального моменту нагрузки, в электроприводах с системами подчиненного регулирования и наблюдателями состояния//Электротехника. 1998. № 2. С.29—35.
11. Долбня В.Т. Топологические методы анализа и синтеза электрических цепей и систем. Харьков: Вища школа, 1974.
12. Управление вентильными электроприводами постоянного тока/Е.Д.Лебедев, В.Е.Неймарк, М.Я.Пистрак, О.В.Слежановский М.: Энергия, 1970.

Расчеты электромеханических переходных процессов в системе электроснабжения горных машин

Е.К ЕЩИН, доктор техн. наук, проф.

Кузбасский ГТУ

Даны расчеты динамических процессов в электроприводах горных машин с использованием предлагаемой модели преобразования электрической энергии совокупностью связанных электромеханических преобразователей (асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором). Приведена информация о программном обеспечении, используемом в расчетной практике.

Схемы электроснабжения добычных участков угольных шахт в качестве основных элементов обычно включают в себя электрооборудование забойного комбайна и забойного конвейера. В большинстве случаев [1] для добычных участков, разрабатывающих пологие и наклонные пласты, электродвигатели получают энергию в соответствии с рис.1, которому соответствует принципиальная схема рис.2. При этом мощности используемых в приводах этих машин асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД) соизмеримы друг с другом.

Соизмеримость мощностей электродвигателей забойных машин, работающих по схеме рис.2, а также значительная длина участков кабелей, через которые двигатели получают энергию, определяют возможность влияния изменений в условиях работы любого из двигателей на состояние остальных. Это, в свою очередь, означает необходимость

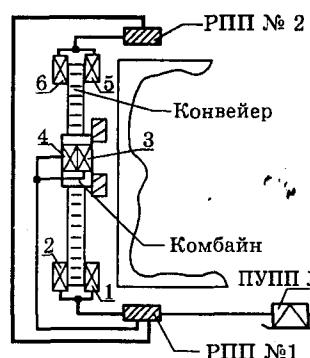
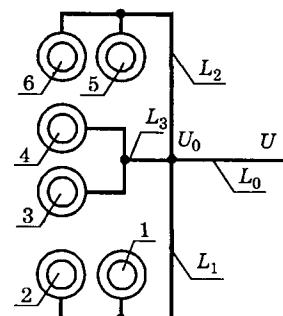


Рис.1. Схема электроснабжения лавы:
РПП №1,2 — распределительные пункты лавы; ПУПП №1 — передвижная участковая подземная подстанция; 1,2,...,6 — асинхронные двигатели забойного комбайна (3,4) и конвейера

Рис.2. Принципиальная схема электроснабжения забойного комбайна и конвейера:

L_0 — длина участка питающего кабеля от ПУПП №1 до РПП №1; L_1, L_2, L_3 — длины участков питающих кабелей от РПП №1 до электродвигателей забойного комбайна (L_3) и конвейера (L_1, L_2)



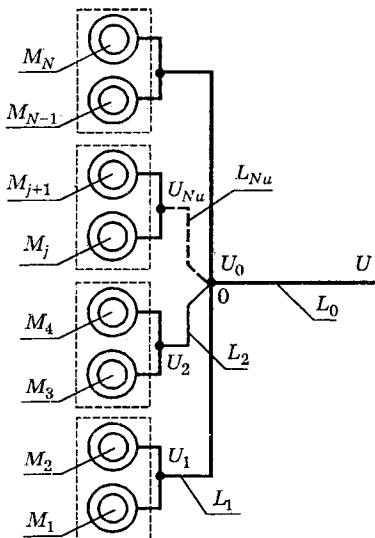


Рис.3. Общая схема электроснабжения двухдвигательных приводов горных машин

рассмотрения динамических процессов в электроприводах горных машин не на основе использования математических моделей одиночных электродвигателей, а с использованием модели преобразования энергии некоторой совокупностью связанных электромеханических преобразователей (асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором).

Связи между электродвигателями могут быть как электрическими (через питающие кабели), так и механическими, например, при механически связанных роторах в приводах некоторых типов забойных комбайнов и скребковых конвейеров.

В общем виде схема по рис.2 будет состоять из отдельных электромеханических модулей $\{M_1, M_2, \dots, [M_i, M_{i+1}], \dots, [M_{n-1}, M_n]\}$ и выглядеть следующим образом (рис.3).

В еще более общем виде (рис.4) модули могут содержать больше двух двигателей. Обозначим через Nm количество электродвигателей в модуле, N — количество электродвигателей в системе электроснабжения, $Nu = \text{int}((j+Nm-1)/Nm)$ — номер модуля по рис.3,4 ($\text{int}(<\text{выражение}>)$ — выделяет целую часть выражения). Модули будут содержать двигатели с обозначениями $[M_1, M_2, \dots, M_{Nm}], \dots, [M_j, M_{j+1}, \dots, M_{j+Nm-1}], \dots, [M_{N-Nm+1}, \dots, M_N]$.

При этом описание применяемых в при-

¹ Поскольку многообразие электромеханических переходных процессов включает и аварийные процессы, связанные с повреждениями обмоток статоров, вызывающими появление электрической асимметрии статора, то в этом случае следует предпочтеть разложение на составляющие α и β [2].

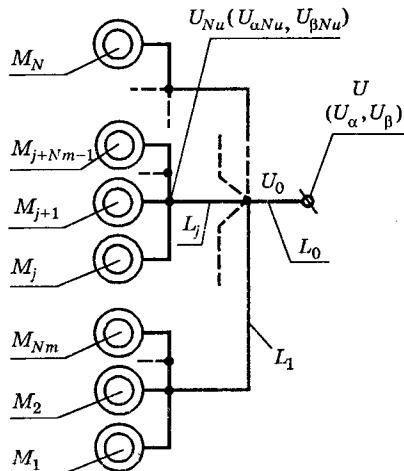


Рис.4. Общая схема электроснабжения приводов горных машин

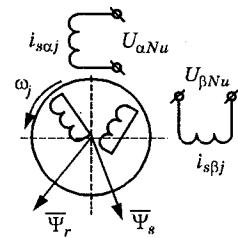


Рис.5. Расчетная схема асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором для (1)

водах горных машин асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в неподвижной¹ системе координат α , β применительно к системе обозначений на рис.4 можно получить на основе [2,3] (рис.5):

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \Psi_{s\alpha j} &= U_{\alpha Nu} - R_{s\alpha j} i_{s\alpha j}; \\ \frac{d}{dt} \Psi_{s\beta j} &= U_{\beta Nu} - R_{s\beta j} i_{s\beta j}; \\ \frac{d}{dt} \Psi_{r\alpha j} &= -R_{rj} i_{r\alpha j} - p_j \omega_j \Psi_{r\beta j} = f_j^3; \\ \frac{d}{dt} \Psi_{r\beta j} &= -R_{rj} i_{r\beta j} + p_j \omega_j \Psi_{r\alpha j} = f_j^4, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $R_{s,r}$ — активные сопротивления обмоток статоров и роторов АД; p_j — число пар полюсов; ω_j — геометрическая угловая скорость вращения ротора электродвигателя; $\Psi_{s\alpha j}$, $\Psi_{s\beta j}$, $\Psi_{r\alpha j}$, $\Psi_{r\beta j}$ — составляющие потокосцеплений статора и ротора по осям неподвижной системы координат; j — в индексном обозначении определяет номер двигателя; $U_{\alpha Nu}$, $U_{\beta Nu}$ — составляющие напряжений статоров двигателей.

Известны отношения

$$i_{s\alpha j} = \frac{\Psi_{s\alpha j}}{L'_{s\alpha j}} - \frac{k_{rj}}{L'_{s\alpha j}} \Psi_{r\alpha j}; \quad i_{s\beta j} = \frac{\Psi_{s\beta j}}{L'_{s\beta j}} - \frac{k_{rj}}{L'_{s\beta j}} \Psi_{r\beta j}, \quad (2)$$

которые после дифференцирования можно представить в виде

$$\frac{di_{s\alpha j}}{dt} = \frac{1}{L'_{s\alpha j}} \frac{d\Psi_{s\alpha j}}{dt} - \frac{k_{rj}}{L'_{s\alpha j}} f_j^3; \quad \frac{di_{s\beta j}}{dt} = \frac{1}{L'_{s\beta j}} \frac{d\Psi_{s\beta j}}{dt} - \frac{k_{rj}}{L'_{s\beta j}} f_j^4. \quad (3)$$

В (2) и далее k_{rj} , $L'_{s\alpha j}$ — коэффициенты электромагнитной связи и переходные индуктивности. (Следует отметить, что при дифференцировании полагались малыми высшего порядка малости производные по времени от индуктивностей. Справедливость последнего доказывается).

Используя условия Кирхгофа для токов

по узлу 0 и напряжений по контурам схемы на рис.4, после выполнения определенных аналитических преобразований с использованием (3) получим, что составляющие напряжений статоров двигателей $U_{\alpha Nu}$, $U_{\beta Nu}$ записутся следующим образом ($i = 1, 2, \dots, N$):

$$\left. \begin{aligned} U_{\alpha Nu} &= U_{\alpha} - L_{k0} \sum_{j=1}^N \frac{1}{L'_{sj}} \frac{d\Psi_{saj}}{dt} + L_{k0} \sum_{j=1}^N \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} f_j^3 - \\ &- R_{k0} \sum_{j=1}^N i_{saj} - L_{kNu} \sum_{j=[Nm-Nu-Nm+1]}^{[Nm-Nu]} \frac{1}{L'_{sj}} \frac{d\Psi_{saj}}{dt} + \\ &+ L_{kNu} \sum_{j=[Nm-Nu-Nm+1]}^{[Nm-Nu]} \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} f_j^3 - R_{kNu} \sum_{j=[Nm-Nu-Nm+1]}^{[Nm-Nu]} i_{saj}; \\ U_{\beta Nu} &= U_{\beta} - L_{k0} \sum_{j=1}^N \frac{1}{L'_{sj}} \frac{d\Psi_{s\beta j}}{dt} + L_{k0} \sum_{j=1}^N \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} f_j^4 - \\ &- R_{k0} \sum_{j=1}^N i_{s\beta j} - L_{kNu} \sum_{j=[Nm-Nu-Nm+1]}^{[Nm-Nu]} \frac{1}{L'_{sj}} \frac{d\Psi_{s\beta j}}{dt} + \\ &+ L_{kNu} \sum_{j=[Nm-Nu-Nm+1]}^{[Nm-Nu]} \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} f_j^4 - R_{kNu} \sum_{j=[Nm-Nu-Nm+1]}^{[Nm-Nu]} i_{s\beta j}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где L_{k0} , R_{k0} — индуктивность и активное сопротивление общего участка кабельной сети (длиной L_0 по рис.3,4); L_{kNu} , R_{kNu} — индуктивности и активные сопротивления кабелей модулей (длины $L_1, \dots, L_j, \dots, L_{Nu}$ по рис.3,4).

Объединив (1) и (4), получим для $i \in (1, N)$ модель электромеханического преобразования энергии совокупностью связанных электромеханических преобразователей (асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором) в общей для них системе электроснабжения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{sai}}{dt} + L_{k0} \sum_{j=1}^N \frac{1}{L'_{sj}} \frac{d\Psi_{saj}}{dt} + L_{kNu} \sum_{j=[Nm-Nu-Nm+1]}^{[Nm-Nu]} \frac{1}{L'_{sj}} \times \\ \times \frac{d\Psi_{saj}}{dt} &= U_{\alpha} + L_{k0} \sum_{j=1}^N \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} f_j^3 - R_{k0} \sum_{j=1}^N i_{saj} + L_{kNu} \times \\ \times \sum_{j=[Nm-Nu-Nm+1]}^{[Nm-Nu]} \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} f_j^3 - R_{kNu} \sum_{j=[Nm-Nu-Nm+1]}^{[Nm-Nu]} i_{saj} - R_{si} i_{sai}; \\ \frac{d\Psi_{s\beta i}}{dt} + L_{k0} \sum_{j=1}^N \frac{1}{L'_{sj}} \frac{d\Psi_{s\beta j}}{dt} + L_{kNu} \sum_{j=[Nm-Nu-Nm+1]}^{[Nm-Nu]} \frac{1}{L'_{sj}} \times \\ \times \frac{d\Psi_{s\beta j}}{dt} &= U_{\beta} + L_{k0} \sum_{j=1}^N \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} f_j^4 - R_{k0} \sum_{j=1}^N i_{s\beta j} + L_{kNu} \times \\ \times \sum_{j=[Nm-Nu-Nm+1]}^{[Nm-Nu]} \frac{k_{rj}}{L'_{sj}} f_j^4 - R_{kNu} \sum_{j=[Nm-Nu-Nm+1]}^{[Nm-Nu]} i_{s\beta j} - R_{si} i_{s\beta i}; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{rai}}{dt} &= -R_{ri} i_{rai} - p_i \omega_i \Psi_{r\beta j} = f_j^3; \\ \frac{d\Psi_{r\beta i}}{dt} &= -R_{ri} i_{r\beta i} + p_i \omega_i \Psi_{rai} = f_j^4. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Совокупность (5) вместе с уравнениями движения электроприводов образует систему из $5N$ обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений².

Для получения численного решения необходимо эту систему привести к каноническому виду, т.е. разрешить ее относительно первых производных от потокосцеплений по времени. Это возможно при рассмотрении (5) как системы линейных алгебраических уравнений относительно упомянутых производных для каждого момента времени. Необходимый при этом определитель системы при решении ее методом Гаусса, например, для $Nm=2$, будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 + \frac{L_{k0} + L_{k1}}{L'_{s1}} & \frac{L_{k0} + L_{k1}}{L'_{s2}} & \frac{L_{k0}}{L'_{s3}} \\ \frac{L_{k0} + L_{k1}}{L'_{s1}} & 1 + \frac{L_{k0} + L_{k1}}{L'_{s2}} & \frac{L_{k0}}{L'_{s3}} \\ \frac{L_{k0}}{L'_{s1}} & \frac{L_{k0}}{L'_{s2}} & 1 + \frac{L_{k0} + L_{k2}}{L'_{s3}} \\ \frac{L_{k0}}{L'_{s1}} & \frac{L_{k0}}{L'_{s2}} & \frac{L_{k0} + L_{k2}}{L'_{s3}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{L_{k0}}{L'_{s1}} & \frac{L_{k0}}{L'_{s2}} & \frac{L_{k0}}{L'_{s3}} \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} \frac{L_{k0}}{L'_{s4}} & \dots & \frac{L_{k0}}{L'_{sN}} \\ \frac{L_{k0}}{L'_{s4}} & \dots & \frac{L_{k0}}{L'_{sN}} \\ \frac{L_{k0}}{L'_{s4}} & \dots & \frac{L_{k0}}{L'_{sN}} \\ \frac{L_{k0} + L_{k2}}{L'_{s4}} & \dots & \frac{L_{k0}}{L'_{sN}} \\ \frac{L_{k0} + L_{k2}}{L'_{s4}} & \dots & \frac{L_{k0}}{L'_{sN}} \\ 1 + \frac{L_{k0} + L_{k2}}{L'_{s4}} & \dots & \frac{L_{k0} + L_{k2}}{L'_{sN}} \\ \dots & \dots & 1 + \frac{L_{k0} + L_{k\text{int}((N+1)/2)}}{L'_{sN}} \end{vmatrix} \quad (6)$$

² Заметим, что эта же модель применима для рассмотрения переходных процессов при использовании асинхронных двигателей с фазным ротором, поскольку аналитические конструкции выражений f_i^3 , f_i^4 , определяющих состояние роторных цепей, сохраняются неизменными. Назначая их, можно определить тип ротора.

Для использования в расчетной практике математической модели (5) электромеханического преобразования энергии совокупностью асинхронных двигателей с коротко-замкнутым ротором, находящихся в системе электроснабжения горных машин по варианту рис.4, в Кузбасском государственном техническом университете на ее (модели) основе разработано программное обеспечение, которое позволяет задавать конфигурацию и условия работы системы электроснабжения путем задания:

количество модулей в системе электроснабжения;

числа двигателей в модуле (с вариантом для разного количества двигателей в модулях);

длин питающих кабелей;

параметров двигателей и кабелей (типов, марок);

последовательности включения или отключения двигателей для имитации реальных процессов пусков и отключений приводов горных машин, причем учет изменения активных сопротивлений и индуктивных сопротивлений рассеяния вследствие вытеснения тока и насыщения путей рассеяния можно вести на основе зависимостей этих параметров от скольжения, получаемых, например по [4,5];

характера нагрузки на электродвигателях при моделировании режимов работы реальных горных машин.

Рассмотрим пример, соответствующий рис.1. В этом варианте количество двигателей в модулях $N_m=2$, а количество модулей равно трем, т.е. рассмотрим одновременно происходящие электромеханические динамические процессы, например, в четырехдвигательном приводе забойного скребкового конвейера и двухдвигательном приводе комбайна при последовательном пуске электродвигателей системы. Примем длины кабелей:

до головного привода конвейера от РПЛ-№ 1 $L_1=100$ м;

до хвостового привода (от РПЛ-№1 через РПЛ-№2) $L_2=250$ м;

до привода комбайна (от РПЛ-№1) $L_3=200$ м.

Привод конвейера оснащен двигателями АВР280Л4, привод комбайна — двигателями ЭКВ4У. Длина общей части кабельной сети (от ПУПП №1 до РПЛ-№1) $L_0=100$ м.

Некоторые результаты моделирования процессов последовательного пуска всех электродвигателей системы представлены

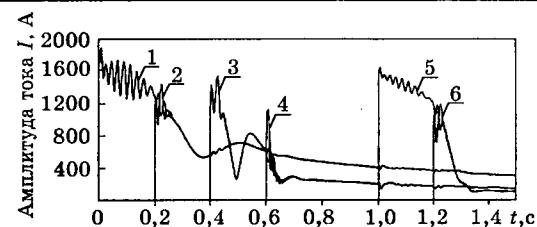


Рис.6. Изменения токов электродвигателей конвейера и комбайна при последовательном пуске:

1,2 — хвостового привода конвейера; 3,4 — головного привода конвейера; 5,6 — двигателей комбайна

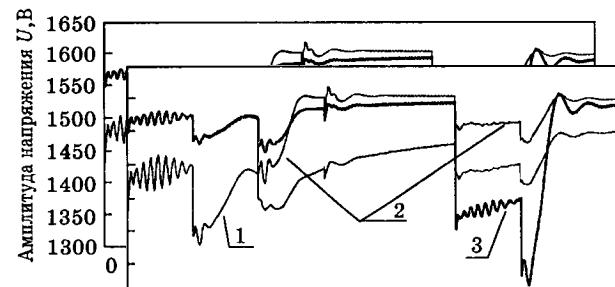


Рис.7. Изменения напряжения на электродвигателях конвейера и комбайна при последовательном пуске:

1 — хвостового привода; 2 — головного привода; 3 — комбайна

на рис.6,7.

Полученные зависимости для этого примера дают возможность оценить предельные значения и длительность пиковых значений тока (рис.6) каждого электродвигателя и, естественно, суммарных пиков токов в сети. По данным рис.7 имеется возможность оценить уровни напряжений на электродвигателях в режимах пуска.

Таким образом, на основе использования математической модели (5) возможно получение необходимой информации о состоянии электромеханических систем горных машин при преобразовании электрической энергии в сети электроснабжения добычного участка для широкого спектра режимов работы горных машин, включая аварийные.

Список литературы

1. Щуцкий В.И., Волощенко Н.И., Плащанский Л.А. Электрификация подземных горных работ. М.: Недра, 1986.
2. Ковач К., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
3. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. М.: Энергия, 1973.
4. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. М.: Высшая школа, 1975.
5. Ещин Е.К., Иванов В.Л., Алешин Д.А. Автоматизация экспресс-испытаний асинхронных электродвигателей//Электротехника. 1995. № 5. С.59—61.

ИЗОЛЯЦИОННАЯ ТЕХНИКА

Развитие производства конкурентоспособной электроизоляционной продукции

И.Е.КУИМОВ, генеральный директор ЗАО «Элинар»

Решающим условием выживания предприятия в условиях рыночной экономики и последующего его нормального развития является обновление выпускаемой продукции. В последние годы ЗАО «Элинар» значительно расширил номенклатуру электроизоляционных материалов, сократив сроки освоения новых видов материалов. Показаны перспективные направления развития производства конкурентоспособной продукции.

Известно, что основными критериями конкурентоспособности продукции являются качество и цена. Данная статья посвящена перспективам развития производства конкурентоспособных электроизоляционных материалов (ЭИМ) в ЗАО «Элинар» с позиции повышения качества, определяющего их потребительские свойства. Высокие потребительские свойства ЭИМ обеспечиваются путем повышения уровня технологии производства, модернизации оборудования и создания современных материалов с показателями на уровне мировых аналогов.

В течение последних двух лет в ЗАО «Элинар» проводились работы по созданию системы управления качеством продукции в соответствии с международным стандартом ИСО-9000. Высокий уровень организационной и технической подготовки к сертификационной проверке позволил производству электроизоляционной продукции получить сертификат ИСО-9002 голландской фирмы «Кема».

Рассмотрим вопросы создания новых материалов исходя из анализа качества основной номенклатуры выпускаемой продукции ЗАО «Элинар».

Крупнотоннажное производство электроизоляционной продукции ЗАО «Элинар» состоит из следующей номенклатуры:

— композиционные материалы на основе синтетических полимерных материалов, применяемые в качестве изоляции электротехнического оборудования общепромышленного исполнения;

— слюдяные бумаги и слюдосодержащие материалы, включающие гибкие, формовочные, коллекторные слюдиниты и слюдопласти и ленты.

Анализ выпускаемой продукции с точки зрения соответствия требованиям международных стандартов показывает следующее:

— электроизоляционные материалы, состоящие из пленки ПЭТ-Э и синтетических нагревостойких бумаг композиции ДМД (дакрон-майлар-дакрон) и NMN (номекс-майлар-номекс) разрабатывались по техническим требованиям ведущих отраслевых НИИ по электромашиностроению при создании перспективных асинхронных электродвигателей серий АИ и 5А; эти материалы выпускаются на современном оборудовании и по таким показателям, как жесткость, стойкость к надрыву, электрическая прочность и нагревостойкость не уступают мировым аналогам; они обеспечивают выпуск асинхронных электродвигателей класса нагревостойкости F сроком службы изоляции 20000 ч (ДМД) и 40000 ч (NMN) на механизированных линиях изготовления статоров; эта номенклатура является конкурентоспособной на внутреннем и внешних рынках;

— коллекторные материалы разработаны при выполнении программы по замене коллекторных мikanитов; для выпуска этих материалов запущено современное технологическое оборудование, на котором производятся лакировка слюдяной бумаги, прессование и шлифование листов; наиболее важными показателями при оценке качества коллекторных слюдинитов и слюдопластов являются: минимальное отклонение по толщине, минимальное значение горячей усадки, высокая механическая прочность и нагревостойкость; эти показатели соответствуют требованиям международных стандартов.

Сложнее решается вопрос обновления номенклатуры слюдяных бумаг и слюдосодержащих лент по следующим причинам. Во-первых, для совершенствования технологии производства слюдяных бумаг требуются значительные капитальные вложения. Во-вторых, замена электроизоляционных материалов в изоляции обмотки, например, турбо-,

гидрогенераторов и высоковольтных электродвигателей, возможна после проведения длительных ресурсных испытаний на надежность. Поэтому слюдосодержащие ленты относятся к наиболее «консервативной» части выпускаемой номенклатуры. Эта номенклатура требует обновления и повышения качества. В связи с этим в начале 90-х годов ЗАО «Элинар» начал осуществлять программу по внедрению новых технологических процессов производства слюдяных бумаг, а несколько позже — по созданию новых слюдосодержащих лент на основе этих бумаг.

Производство слюдяных бумаг

Известно, что слюдяная бумага (СБ) обеспечивает основной диэлектрический барьер в электрической изоляции и такие ее свойства, как пропитываемость, пористость, отклонения по массе квадратного метра в значительной мере влияют на качество изоляции обмоток электрооборудования. Поэтому все работы по созданию новых и улучшению показателей существующих слюдосодержащих ЭИМ, как правило, начинаются с совершенствования технологии производства СБ.

Рассмотрим состояние производства СБ в России на начало 90-х годов.

Современный технологический процесс производства СБ состоит из двух этапов:

— получение из кристаллов слюды слюдяной пульпы требуемого качества;

— получение из пульпы слюдяной бумаги.

Второй этап технологического процесса мало зависит от способа получения пульпы и осуществляется на бумагоделательных машинах.

Существует две принципиально отличающиеся технологии получения слюдяной пульпы: термогидромеханический и гидромеханический процессы. В промышленных масштабах СБ по термогидромеханическому процессу получают из мусковита, так как мусковит под воздействием температуры (700—850°C) претерпевает целый ряд изменений: вслучивание и дегидратацию. Вспученный мусковит подвергается гидромеханическому расщеплению для последующего получения слюдяной пульпы. Бумага, получаемая по описанному процессу, известна в России как слюдинитовая. Термогидромеханический процесс получения СБ из мусковита разработан в ВЭИ и внедрен в 1958 г. на заводе «Электрослюдинит» (ныне ЗАО «Элинар»). Существующее оборудование позволяет получать СБ с поверхностной плотностью до 120 г/м².

Гидромеханический процесс получения пульпы исключает высокотемпературную обработку слюды. По этому процессу получают пульпу из мусковита и флогопита путем расщепления кристаллов слюды в водной среде за счет энергии струи воды. Бумага, получаемая по этому процессу, известна как слюдопластовая. Слюдопластовую бумагу из флогопита выпускают предприятия бывшего Минпромстройматериалов. Работы по получению слюдопластовой бумаги из мусковита, отвечающей требованиям электротехнической промышленности, на оборудовании этих предприятий не дали положительных результатов.

При оценке качества СБ учитываются характеристики, влияющие на надежность системы изоляции: поверхностная плотность и ее отклонение, пропитываемость и пористость, как производные от гранулометрического состава слюдяных частиц, формирующих полотно бумаги.

С этих позиций для создания надежной системы изоляции требуется слюдяная бумага из мусковита со следующими свойствами:

- поверхностная плотность от 120 до 200 г/м², среднее отклонение 5—7%;
- пропитываемость не более 15—30 с;
- пористость по Герлею не более 1000 с/100 мл;
- электропроводность водной вытяжки 10—15 мкСм/см.

Все типы СБ, выпускаемые на предприятиях России до начала 90-х годов, не соответствовали этим требованиям. По техническим показателям они более пригодны для производства гибких, формовочных и коллекторных слюдосодержащих ЭИМ и нагревательных элементов.

Для производства слюдосодержащих лент на уровне лучших мировых аналогов необходимо было организовать в России производство СБ соответствующего качества. С этой целью в начале 90-х годов в ЗАО «Элинар» запущена технологическая линия по производству слюдопластовых бумаг, состоящая из оборудования для гидромеханического расщепления кристаллов слюды и бумагоделательной машины новой конструкции. В настоящее время отработана технология и освоен промышленный выпуск слюдопластовых бумаг из мусковита и флогопита поверхностной плотностью 75—200 г/м². Ранее запущенное оборудование по производству слюдинитовых бумаг и новая линия по производству слюдопластовых бумаг по-

зволяют выпускать практически весь ассортимент СБ в соответствии с требованиями международного стандарта МЭК 371-3-2.

Приведенные в табл.1 сравнительные свойства СБ из мусковита, получаемых по двум технологиям, показывают наличие следующих преимуществ слюдопластовой бумаги:

- значительное улучшение пропитываемости;
- низкое значение сопротивления прохождению воздуха (показатель Герлея);
- наименьшее значение электропроводности водной вытяжки.

Кроме того, опыт применения слюдопластовой бумаги из флогопита показал, что бумага, получаемая на новой линии ЗАО «Элинар», по качественным показателям превосходит аналогичные бумаги, выпускаемые на Колпинской и Петрозаводской слюдяных фабриках.

Сравнение показателей слюдопластовой бумаги из мусковита с техническими требованиями показывает, что они могут быть использованы для создания новых слюдосодержащих лент для высоковольтной изоляции. Внедрение в ЗАО «Элинар» технологии производства слюдопластовых бумаг из мусковита и флогопита решает проблему обеспечения электротехнической промышленности качественными слюдосодержащими материалами. Сегодня ЗАО «Элинар» имеет мощности по производству СБ из мусковита и флогопита, достаточные как для удовлетворения собственной потребности, так и выполнения заказов других предприятий, в том числе и зарубежных.

Производство слюдосодержащих лент для изоляции высоковольтного электрооборудования

Номенклатура серийных слюдосодержащих лент состоит из предварительно пропитанных: ЛСЭН-526 Т, ЛСК-110 СТ, ЛСМ, ЛСУ и непропитанных: ЛСКН-160ТТ, ЛСКО-180Т и ЛСКН-135СПл. Они включены в конструкторскую документацию для изготовления изоляции обмоток турбо-, гидрогенераторов и высоковольтных электродвигателей,

изготавливаемых прессовым методом и методом вакуум-нагнетательной пропитки. Последние десятилетия они обеспечивают выпуск и ремонт крупных электрических машин практически на всех энергомашиностроительных предприятиях России и СНГ.

Однако с учетом современных требований к качеству слюдосодержащих лент и системе высоковольтной изоляции серийные ленты имеют следующие недостатки:

- низкое содержащие слюды, значение которой составляет 35—60%;

— низкая рабочая напряженность электрического поля на изоляции обмоток, изготовленных на серийных лентах, не превышающая 2 кВ/мм.

Для сравнения слюдосодержащие ленты фирм «Вон Ролл Изола» и «Изовольта», применяемые для высоковольтной изоляции, имеют содержание слюды 65—80% (табл.2). В системах изоляции Изотенакс фирмы «Альстом» и Микадур фирмы АББ рабочая напряженность электрического поля в изоляции обмотки 2,5 кВ/мм. Высокая напряженность поля в этих системах достигается за счет утончения изоляции обмотки (табл.3). В итоге удельные характеристики электрооборудования этих фирм имеют более высокие показатели, чем в аналогичном оборудовании отечественных производителей.

ЗАО «Элинар», являющийся производителем электроизоляционных материалов, при сравнении качества систем изоляции не может учитывать конструкцию электрооборудования, уровень технологии изготовления электрической обмотки, которые, несомненно, оказывают значительное влияние на качество получаемой изоляции.

Традиционно, как и во всем мире, при создании слюдопластовых лент использовали бумагу из мусковита, а для кабельных изделий — СБ из мусковита и флогопита в зависимости от требований к огнестойкости.

Конструкция слюдопластовой ленты, помимо СБ, содержит армирующую подложку в виде стеклоткани, которая обеспечивает физико-механическую прочность. В новых лентах мы использовали новые «тонкие»

Таблица 1

Наименование показателей	Методика испытаний	Бумага слюдинитовая 2120	Бумага допластовая 3120
Поверхностная плотность, г/м ²	МЭК 371-2	120	120
Пропитываемость, с	«—»	62	14
Пористость по Герлею, с/100 мл	ИСО 3687	2780	950
Разрывная прочность, Н/см	МЭК 371-2	10	6
Электропроводность водной вытяжки, мкСм/м	ГОСТ 26858-86	1790	1260

Таблица 2

Наименование показателей	Методы испытаний	Серийная лента ЛСКН-160ТТ	Самикапор 36658 "Вон Ролл Изола"
Номинальная толщина, мм	МЭК 371-2	0,13	0,15
Поверхностная плотность, г/м ²	«—»	160	192
слюдяной бумаги (мусковит)	«—»	65(40)	160(80)
стеклоткани	«—»	45×2	23
связующего	«—»	9(5,6)	9(4,5)
Разрывная прочность, Н/см	«—»	200	80
Пористость по Герлею, с/100 мл	ISO 3687	2000	800
Класс нагревостойкости		F	F

марки стеклотканей Э4-35 и Э(с)-38, которые имеют разрывную прочность на уровне стеклоткани Э4-46. Повышение номинальной толщины лент производилось за счет применения СБ с поверхностной плотностью 120—180 г/м². Так как слюдопластовые ленты будут перерабатываться на существующих лентоизолировочных станках, в связи с тем, что модернизация их не планируется в ближайшие годы, необходимо сохранить выпуск лент с двумя стеклоподложками с целью обеспечения более высокой механической прочности ленты при изготовлении стержневой изоляции турбо-, гидрогенераторов. Как модификация такой конструкции имеется вариант ленты, где одна стеклоподложка заменена полиэфирной нетканой бумагой.

В табл.4 приведены основные показатели непропитанных слюдопластовых лент Элмикапор¹ для изготовления изоляции вакуум-нагнетательной пропиткой монолит. Видно, что в конструкциях новых лент Элмикапор существенно увеличено содержание слюды по сравнению с серийно выпускаемыми лентами ЛСКН-160ТТ и ЛСКО-180Т. Кроме того, за счет модификации связующего повышена адгезионная прочность СБ к стеклоподложке. Этот показатель не имеет количественной оценки, а определяется косвенным путем на специально разработанной установке. Сравнение показателей в табл.2 и 4 показывает, что основные свойства слюдопластовых лент находятся на уровне требований лучших аналогов.

Можно прогнозировать улучшение следующих качественных показателей изоляции монолит на основе слюдопластовых лент Элмикапор:

— сокращение цикла атмосферной сушки изоляции обмоток перед вакуумной пропиткой, так как более пористая структура слюдопластовой бумаги облегчает удаление летучих продуктов;

¹ Зарегистрированная торговая марка ЗАО «Элинар».

— экономия пропиточного компаунда ПК-11 в связи с тем, что пропитку в вакуумном котле можно производить более вязким компаундом за счет более высокой скорости пропитки слюдопластовой бумаги;

— минимальное повреждение слюдяного барьера при лентоизолировочных работах за счет увеличения адгезии СБ к стеклоподложке;

— снижение толщины изоляции за счет повышения содержания слюды в ленте.

Для проведения ускоренного электрического старения были изготовлены натурные катушки с изоляцией монолит-2 на лентах Элмикапор 553099 и ЛСКН-160ТТ. Анализ результатов тангенса угла диэлектрических потерь, измеренного на пазовых частях катушки (табл.5), показывает, что наименьшее значение прироста тангенса угла диэлектрических потерь отмечается у изоляции, изготовленной на слюдопластовой ленте Элмикапор 553099.

Определение времени до пробоя изоляции проводилось на воздухе при напряженности электрического поля 12 кВ/мм промышленной частоты. Для анализа результатов дли-

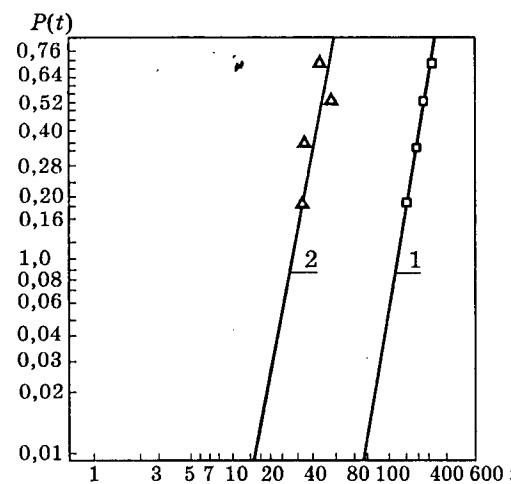


Рис.1. Функции распределения времени до пробоя изоляции натурных катушек по Вейбуллу при $E_{\text{пр}}=12$ кВ/мм
— □ — лента Элмикапор 553099; — Δ — лента ЛСКН-160ТТ

Таблица 3

Система изоляции	Предприятие, фирма-изготовитель	Номинальное рабочее напряжение, кВ	Толщина изоляции, мм	Рабочая напряженность электрического поля, кВ/мм
Изопролент	ПО «Электротяжмаш»	20	6,0	1,92
Майка пэл II	«Дженерал Электрик»	20	5,5	2,1
Изотенакс N	«Альстом»	20	4,62	2,5
Микадур	АББ	20	4,5	2,57
Термопластик	«Вестингауз Электрик»	20	5,4	2,14
Самикатерм	«Вон Ролл Изола»	6	1,8	1,92
		10	2,8	2,05
		16	4,0	2,3
Кальмика	«Изовольта»	6	1,8	1,92
		10	2,8	2,05

Таблица 4

Наименование показателей	Элмикапор 553099		Элмикапор 55309			Элмикапор 553059	
Номинальная толщина, мм	0,14	0,16	0,12	0,14	0,17	0,14	0,16
Среднее отклонение от номинальной толщины	$\pm 0,015$	$\pm 0,02$	$\pm 0,015$	$\pm 0,015$	$\pm 0,02$	$\pm 0,015$	$\pm 0,02$
Поверхностная плотность, г/м ²	179 ± 16	201 ± 18	150 ± 14	172 ± 15	220 ± 20	177 ± 16	199 ± 18
Содержание компонентов, г/м ² (%):							
— слюдяной бумаги	100 ± 9 (56)	120 ± 10 (60)	100 ± 9 (67)	120 ± 10 (70)	180 ± 16 (80)	100 ± 9 (56)	120 ± 10 (60)
— стеклоткани	38 ± 4	38 ± 4	38 ± 4	38 ± 4	38 ± 4	38 ± 4	38 ± 4
— стеклоткани	27 ± 3	27 ± 3	—	—	—	—	—
— полиэфирной бумаги	—	—	—	—	—	25 ± 3	25 ± 3
— связующего	14 ± 5 (8±3)	16 ± 6 (8±3)	12 ± 5 (8±3)	14 ± 5 (8±3)	17 ± 6 (8±3)	14 ± 5 (8±3)	16 ± 6 (8±3)
Разрушающая нагрузка при растяжении, Н/см	≥ 200	≥ 200	≥ 140	≥ 140	≥ 140	≥ 140	≥ 140
Пробивное напряжение, кВ	$\geq 1,5$	$\geq 1,5$	$\geq 1,5$	$\geq 1,5$	$\geq 1,5$	$\geq 1,5$	$\geq 1,5$
Пористость по Герлею, с/100 мл	≤ 1000	≤ 1000	≤ 1000	≤ 1000	≤ 1000	≤ 1000	≤ 1000

Таблица 5

№ партии	Изоляция натурых катушек двигателя 6,9 кВ	tg δ при напряжении									Δtgδ _{ep} , %	
		3 кВ			6 кВ			9 кВ				
		мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.		
2	Монолит-2 на ленте	0,60	0,99	0,83	0,69	1,21	0,95	0,70	1,90	1,24	0,41	
3	Элмикапор 553099	0,64	0,89	0,77	0,81	1,09	0,92	0,99	1,63	1,14	0,37	
4	Монолит-2 на ленте	0,62	1,10	0,84	0,70	1,41	1,03	1,00	1,90	1,40	0,65	
5	ЛСКН-160ТТ	0,59	0,81	0,69	0,69	1,22	0,92	0,93	1,35	1,27	0,58	

тельной электрической прочности построили функции распределения до пробоя. Анализ положения прямых на рис.1 показывает, что наибольшим временем до пробоя обладает изоляция монолит-2, выполненная на ленте Элмикапор 553099.

Полученные результаты показывают повышение надежности изоляции обмоток, выполненных на слюдопластовой ленте.

Эти данные показывают наличие запаса электрической прочности, который позволяет реально снизить толщину изоляции.

На первых этапах испытания слюдопластовой ленты мы убедились в преимуществах новой системы изоляции. Вопросы сокращения цикла изготовления изоляции на новой ленте будут исследованы на следующих этапах работ. Эти испытания планируется закончить в текущем году.

Серийная предварительно пропитанная слюдинитовая лента ЛСЭН-526Т широко применяется для стержневой изоляции турбо-, гидрогенераторов. Изоляция монотерм на основе этой ленты по сравнению с други-

Таблица 6

Наименование показателя	ЛСЭН-526Т	Элмикатерм 55409	Изотенакс N
Номинальная толщина, мм	0,16	0,16	0,20
Поверхностная плотность, г/м ²	215	252	
Содержание компонентов, г/м ² (%):			
— слюдяной бумаги	85 (40)	130 (50)	160 (53)
— стеклоткани	45	27	33
— связующего	85 (40)	95 (38)	— (37)
Разрушающая нагрузка при растяжении, Н/см	180	90	210
Электрическая прочность, кВ/мм	≥25	≥30	37
Тангенс угла диэлектрических потерь, %, при температуре:			
15—35°C	≤0,02	≤0,02	0,02
155°C	≤25	≤25	15
Текущесть связующего, %	40—70	40—70	≥45
Класс нагревостойкости	F	F	F

ми системами изоляции слюдотерм и ВЭС-2 обладает улучшенными тепловыми, электрическими и физико-механическими свойствами. Требования по повышению электрических и физико-механических свойств и нагревостойкости в изоляции монотерм выполняются благодаря применению эпоксиноволачного связующего.

Основные показатели слюдинитовой ленты ЛСЭН-526Т такие, как текучесть связующего, не менее 45%, и кинетика процесса отверждения связующего в ленте являются оптимальными для изготовления изоляции прессовым методом.

Несмотря на то, что лента ЛСЭН-526Т успешно выдерживает конкуренцию на внутреннем и внешнем рынках, целесообразно улучшить ее некоторые качественные характеристики.

Во-первых, наряду с прессовым методом, который больше распространен на ремонтных предприятиях, существует технология изготовления стержневой изоляции генераторов методом гидростатического прессования в битумных автоклавах. Температурно-временной режим гидростатического прессования изоляции значительно отличается от режима изготовления изоляции на прессах с электронагревом. Поэтому требуется существенная модификация эпоксиноволачного связующего. Совершенствование ленты ЛСЭН-526Т позволит расширить область применения при изготовлении стержневой изоляции.

Во-вторых, из-за низкой скорости пропитки слюдинитовой бумаги, технология производства ленты ЛСЭН-526Т является малопропизводительной, а максимальная поверхностная плотность бумаги ограничивается в пределах до 85 г/м², обеспечивая содержание слюды в ленте 35—40%.

При создании новой пропитанной слюдопластовой ленты были учтены перечисленные недостатки серий слюдинитов лент ЛСЭН-526Т. В табл.6 приведены сравнительные свойства новой слюдопластовой ленты Элмикатерм 55409*, серийной слюдинитовой ленты ЛСЭН-526Т и ленты Изотенакс N фирмы «Альстом». Видно, что показатели новой ленты Элмикатерм 55409 и ленты Изотенакс N имеют достаточно близкие значения.

С переходом на слюдопластовую бумагу в 2—3 раза увеличилась производительность при изготовлении ленты Элмикатерм 55409. Вопросы соответствия параметров новой ленты требованиям для гидростатического прессования и увеличения надежности изоляции находятся на стадии исследования в реальных изделиях.

Производство электроизоляционных материалов для изоляции тяговых электродвигателей

Предварительно пропитанные и непропитанные слюдинитовые ленты: ЛСК-110, ЛСЭК-5, ЛСЭП-934, ЛСК-СС, ЛСКН-160ТТ в настоящее время являются базовыми для изготовления изоляции обмоток тяговых электродвигателей (ТЭД) с системами изоляции классов нагревостойкости В и F. Опыт эксплуатации систем изоляции показывает, что они обеспечивают надежную работу ТЭД с ресурсом 15—17 лет.

По-видимому, сегодняшний уровень технологии производства и ремонта ТЭД классов В и F сохранится в обозримом будущем. Следовательно, нет необходимости в улучшении качественных показателей серийных лент. При прогнозировании потребления

* Зарегистрированная торговая марка ЗАО «Элинар».

ЭИМ следует учитывать тенденцию перехода с системы изоляции классов нагревостойкости В и F на класс Н.

В настоящее время в соответствии с Программой по развитию локомотивостроения в России намечены значительные повышения технико-экономических показателей ТЭД для серийных магистральных электровозов серии ВЛ, а также разработки принципиально новых конструкций ТЭД для пассажирских скоростных электровозов. Концепция развития железнодорожного транспорта в части создания нового поколения электровозов потребовала разработки и внедрения ЭИМ и систем изоляции обмоток ТЭД на рабочую температуру 200—220°C. Этой серии материалов посвящена статья специалистов ЗАО «Элинар» и ОАО «ВЭЛНИИ», которая опубликована в этом номере.

В ЗАО «Элинар» осуществляется программа по созданию новых электроизоляционных материалов, массовое применение которых намечается с начала следующего столетия. Выполнение этой программы позволит значительно обновить номенклатуру ЭИМ для применения в современных тяговых электродвигателях.

Производство слюдосодержащих лент для пожаробезопасных кабельных изделий

Номенклатура электроизоляционных материалов ЗАО «Элинар» в последние годы обновляется за счет разработки новых материалов для производства кабельных изделий. Мы внедрили фольгированные диэлектрики для городских телефонных кабелей и кабелей управления.

Но наибольших успехов наши специалисты добились при создании огнезащитных элементов для пожаробезопасных кабелей. При создании этих элементов использовались известные природные свойства слюдяной изоляции, такие, как высокая электрическая прочность, негорючность и огнестой-

кость, абсолютное отсутствие галогенов и высокая радиационная стойкость, которые естественным образом вписываются в требования для пожаробезопасных кабелей.

Итоги работы по созданию огнезащитных элементов закончились разработкой и внедрением двух марок слюдосодержащей ленты, состоящей из стеклоткани и слюдяной бумаги, склеенных и пропитанных специально разработанным высоконагревостойким составом.

Лента Элмикатекс 515* разработана на основе мусковитовой бумаги, а Элмикатекс 525 — флогопитовой бумаги. Основные показатели лент приведены в табл. 7.

Каждый компонент ленты выполняет определенные функции с целью получения следующих важных характеристик:

— слюдяная бумага обеспечивает двойной барьер: температурный и диэлектрический;

— стеклоткань обеспечивает механическую прочность, исключающую повреждение слюдяного барьера при воздействии изгибающих и разрывных усилий в процессе изолировки токопроводящей жилы на высокоскоростных обмоточных станках;

— связующее обеспечивает целостность композиционного материала и дополнительную электрическую прочность за счет изменения химической структуры связующего при воздействии огня.

Комбинация этих характеристик обуславливает применение лент Элмикатекс для защиты кабеля и обеспечения работы кабеля во время и после воздействия огня.

Ленты разработаны в соответствии с требованиями международного стандарта МЭК 371-3-8, по которому классифицируется кабель огнестойкого исполнения при воздействии температуры 750°C в течение 180 мин, а также требованиями ряда национальных стандартов Германии, Франции и

* Зарегистрированная торговая марка ЗАО «Элинар».

Таблица 7

Наименование показателей	Элмикатекс 525 на флогопите			Элмикатекс 515 на мусковите
Толщина, мм	0,14±0,015	0,12±0,015	0,10±0,015	0,12±0,03
Поверхностная плотность изоляции, г/м ²	220±10	180±10	138±8	130±10
— слюдяной бумаги	160±10	127±10	91±8	75±4
— стеклоткани	30±3	30±3	30±3	24±3
— связующего, %	14±2	13±2	13±2	25±2
Прочность на разрыв, Н/мм	>8	>8	>8	>8
Пробивное напряжение, В	2000	1800	1400	1300
Содержание галогенов, %	0	0	0	0
Содержание асбеста, %	0	0	0	0

Таблица 8

Образец	Режим испытаний на огнестойкость			Значение пробивного напряжения, кВ		
	T, °C	τ _{исп} , мин	U _{исп} , В	Элмикатекс 515 с 50% перекрытием	Элмикатекс 525 с 50% перекрытием	Элмикатекс 525 с 75% перекрытием
1	750	180	400	4,0	7,5	—
2	750	180	400	4,5	8,0	—
3	750	180	400	4,0	8,0	—
1	750	180	1000	4,0	7,0	13,5
2	750	180	1000	3,5	7,5	11,5
3	750	180	1000	4,0	8,0	—
1	900	180	400	3,5	7,0	—
2	900	180	400	3,5	6,5	8,0

Китая, в которых испытания кабеля на огнестойкость рекомендуется проводить при температуре 800—900°C в течение 180 мин.

Известно, что слюда флогопит имеет наивысшую температурную стойкость из всех применяемых в промышленности видов слюды. Флогопит сохраняет свои качества при длительном воздействии температуры до 900°C. Постепенное ухудшение свойств флогопита происходит в диапазоне от 900 до 1200°C. Ухудшение свойств мусковита происходит, начиная с 600°C.

В настоящее время мы имеем положительные результаты испытаний лент Элмикатекс по огнестойкости по методике МЭК 371-3-8 и национальных стандартов. В табл.8 приведены результаты испытаний на огнестойкость двухжильного медного провода, изолированного лентами Элмикатекс 515 и Элмикатекс 525 в два слоя. Видно, что образцы провода с изоляционным слоем из лент Элмикатекс 515 и Элмикатекс 525 выдержали испытание на огнестойкость в режиме 750 и 900°C в течение 180 мин. Воздействие температуры 900°C приводит к снижению электрической прочности изоляционного слоя, которое для образца из ленты Элмикатекс 515 составляет 40%, а для образца из лент Элмикатекс 525 — 28%. Следовательно, эти испытания подтверждают вывод о том, что лента Элмикатекс 525 на флогопитовой бумаге выдерживает более высокую температуру по сравнению с лентой на мусковитовой бумаге. Полученные результаты позволяют рекомендовать ленту Элмикатекс 515 для применения в конструкции пожаробезопасного кабеля, удовлетворяющего требованиям МЭК 331-3-8, а ленту Элмикатекс 525 — в конструкциях пожаробезопасного кабеля с более высокими требованиями по температурному режиму.

Выбор типа лент зависит также от класса напряжения кабеля. Самые простейшие конструкции пожаробезопасных кабелей

приведены на рис.2. В целом конструкция пожаробезопасного кабеля представляет собой сложную систему. Поэтому при разработке таких кабелей должны обязательно принимать участие специалисты ВНИИКП.

Технологические испытания лент Элмикатекс проводились в процессе изолирования медной жилы сечением 1 и 2,5 м² на вертикальных станках МО-2М и ДКХ-2Д. Они показали качественное наложение изоляционного слоя в высокоскоростном режиме до 2500 об/мин.

Мы имеем достаточный опыт внедрения лент Элмикатекс в крупных зарубежных кабельных компаниях и убедились в том, что ленты Элмикатекс успешно выдерживают конкуренцию на внешнем рынке.

До последнего времени «узким местом» при серийном внедрении лент Элмикатекс явилось отсутствие опыта и оборудования для раскроя рулона ленты на узкие полосы. Сейчас этот этап успешно пройден. Мы освоили технологию резки лент, имеем парк резательного оборудования, на котором обеспечиваются качественный раскрой и намотка шириной от 4 мм и выше, диаметром ролика до 350 мм.

Из-за отсутствия рынка пожаробезопасных кабелей в России в настоящее время ленты Элмикатекс поставляются на внешний рынок. В текущем году совместными усилиями с ВНИИКП мы планируем начать выпуск пожаробезопасных кабелей на отечественных кабельных заводах. Мощности по производству лент Элмикатекс, имеющиеся в ЗАО «Элинар», рассчитаны на полное удовлетворение потребности зарубежных и отечественных кабельных заводов.

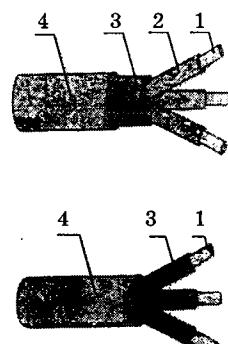


Рис.2. Конструкция пожаробезопасных кабелей
1 — жила; 2 — изоляция;
3 — слюдосодержащая лента; 4 — изоляция

Создание современных электроизоляционных материалов и систем изоляции для тяговых электродвигателей нового поколения электровозов

Ю.М.УКРАИНСКИЙ, инж. (ОАО «ВЭЛНИИ»), В.М.ПАК, канд.техн.наук (ЗАО «Элинар»)

Приведены результаты испытаний изоляции макетов, изготовленных на слюдосодержащих полиимидных пленках. Ресурсные испытания изоляции макетов, проведенные при комбинированном воздействии электрического напряжения переменной частоты и температуре 205°C, показали, что слюдосодержащие полиимидные пленки обеспечивают ресурс работы более 100000 ч.

Прогресс, достигнутый в технологии производства электроизоляционных материалов (ЭИМ) и технике их применения, позволил найти сферу преимущественного их использования в совершенствовании конструкции тяговых электродвигателей (ТЭД). Последние десятилетия в несколько раз увеличилась удельная мощность ТЭД. При этом большая доля прироста мощности обеспечивается за счет повышения качества системы изоляции.

Современные технические требования к мощности на единицу массы, надежности при эксплуатации ТЭД обусловливают необходимость замены системы изоляции класса F изоляцией более высокого класса нагревостойкости, способной функционировать при высокой температуре (200—220°C) и высоком напряжении (3000 В).

По техническим требованиям Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения (ОАО «ВЭЛНИИ») и Новочеркасского электровозостроительного завода (ОАО «НПО НЭВЗ») в последние годы различными предприятиями и институтами России разработан ряд новых ЭИМ нагревостойкостью до 200°C, которые прошли испытания в ОАО «ВЭЛНИИ» и часть из них уже внедрена в производство ОАО «НПО НЭВЗ».

Возможности делового сотрудничества с зарубежными фирмами позволили нам по-

лучить достаточное количество ЭИМ известных западных фирм «Вон Ролл Изола», «Дюпон» и выполнить испытания систем изоляции на их основе. Результаты этих испытаний были использованы в качестве технических требований при разработках отечественных ЭИМ, которые проводились по трем направлениям с точки зрения конструкции материалов и технологий их применения:

- полиимидные пленки с адгезивным слоем (ПМ);
- композиционные ленты на основе полиимидной пленки и слюдинитовых бумаг;
- стеклослюдинитовые ленты с малым содержанием связующего («сухие») и кремнийорганический пропиточный состав без растворителя.

Полиимидная пленка с адгезивным слоем использовалась при выпуске двигателей постоянного и переменного тока, однако из-за низкой короностойкости и высокой стоимости пленки применение ее в корпусной изоляции высоковольтных ТЭД нецелесообразно. Поэтому мы рекомендуем использовать пленку ПМ с адгезивным слоем преимущественно для витковой изоляции.

Учитывая эти недостатки, ЗАО «Элинар» разработал несколько вариантов лент, представляющих собой композиции из полиимидной пленки ПМА, слюдяной бумаги и стеклоткани. Лента Элмикаимид^{*} состоит из

Таблица 1

Наименование показателей	Методы испытаний	ЛСПМ	Элмикаимид
Номинальная толщина, мм	МЭК 371-2	0,13	0,09—0,10
Поверхностная плотность, г/м ²	«—»	183	136
Содержание компонентов, г/м ² (%):			
полиимидной пленки	«—»	56	56
слюдяной бумаги	«—»	45	65
стеклоткани	«—»	27	—
связующего	«—»	(25—30)	(10—15)
Разрывная прочность, Н/см	«—»	100	40
Электрическая прочность, кВ/мм	«—»	30	98
Класс нагревостойкости		Н	Н

* Зарегистрированная торговая марка ЗАО «Элинар».

Вариант изоляции макетов	Изоляция макетов с перекрытием 1/2 ширины		Пропитка и термообработка
	корпусная	покровная	
1	3 слоя Элмикаимид 0,11×20	1 слой ЛЭС 0,1×20	Пропитка лаком КО-916 Термообработка 145°C — 3 ч; 200°C — 16 ч
	4 слоя ЛСПМ 0,13×20	1 слой ЛЭС 0,2×25	Медная шина и каждый слой промазаны лаком КО-916 Термообработка 145°C — 3 ч; 200°C — 16 ч

пленки ПМА и слюдяной бумаги, а в ленте ЛСПМ, помимо этих компонентов, имеется армирующая стеклоткань. Основные свойства этих лент приведены в табл.1. Ленты предназначены для корпусной изоляции ТЭД класса нагревостойкости Н.

Исследования систем изоляции проводились на макетных образцах, представляющих собой медные шины размером 3×20×300 мм, изолированные лентами Элмикаимид и ЛСПМ (табл.2).

В процессе испытаний образцы подвергались воздействию влаги и комплексному воздействию электрического напряжения и температуры. Состояние изоляции оценивалось по значению электрического сопротивления, токов утечки и пробивного напряжения.

Сопротивление изоляции образцов для всех вариантов в исходном состоянии превышало $2 \cdot 10^{10}$ Ом, а после выдержки в воде в течение 1 ч значения сопротивления и токов утечки систем изоляции практически не изменились. Можно оценить изоляцию, как обладающую высокой водостойкостью.

Пробивные напряжения корпусной изоляции макетов определялись при подаче напряжения переменного тока частотой 50 Гц на медную шину, при этом электрод из алюминиевой фольги длиной 100 мм, наложенный в средней части макета, заземлялся. Значения пробивных напряжений и элект-

рической прочности изоляции макетов приведены в табл.3. Видно, что пробивное напряжение обоих вариантов находится в интервале 20—25 кВ, что удовлетворяет требованиям заказчика $U_{\text{пр}} > 20$ кВ для ТЭД с напряжением 1000 В. Электрическая прочность изоляции варианта 1 на 27% выше, чем у варианта 2.

Испытания по определению срока службы изоляции макетов проводились при комплексном воздействии электрического напряжения и температуры 205°C. В соответствии с существующим стандартом изоляция макетов подвергалась ускоренному электрическому старению на воздухе при значении напряжения частотой 50 Гц, равного 0,325 от пробивного напряжения. Испытания макетов проводились до выхода из строя 5 образцов, что составляет 63% количества макетов каждого варианта системы изоляции. В этих испытаниях изоляция макетов имеет разную толщину на сторону, поэтому они старились при различных значениях градиента электрического поля. Значения времени жизни изоляции макетов при ускоренном электрическом старении приведены в табл.4.

Полученные результаты показывают, что лента Элмикаимид обеспечивает более длительный срок службы изоляции по сравнению с лентой ЛСПМ при комплексном воздействии электрического напряжения и температуры 205°C. Данные испытаний изоляции макетов были использованы для расчета теоретического ресурса работы изоляции по методике¹. Оба варианта изоляции макетов имеют ресурс более 100000 ч при температуре 205°C.

В последнее время фирма «Дюпон» активно проводит рекламу новой короностойкой полиимидной пленки Kapton CR. Про-

Номер образца	Пробивное напряжение изоляции макетов, кВ, для вариантов	
	1	2
1	20,4	26,8
2	19,1	24,2
3	19,6	25,7
4	20,0	24,0
5	22,4	24,4
Среднее пробивное напряжение, кВ	20,3	25,0
Толщина изоляции на сторону, мм	0,86	1,44
Средняя электрическая прочность, кВ/мм	23,6	17,3

¹ Симони Л. Общий подход к определению срока службы электрической изоляции при воздействии температуры и электрического напряжения//IEEE Transportation on Electrical Insulation. 1981. Vol.E1—16. № 4.

Таблица 4

Вариант	Испытательное напряжение, кВ	Толщина изоляции на сторону, мм	Напряженность электрического поля, кВ/мм	Среднее значение времени до пробоя изоляции, ч
1	6,6	0,86	7,7	326
2	8,1	1,44	5,6	120

веденные сравнительные испытания изоляции макетов на пленке Kapton CR и лентах Элмикаимид и ЛСПМ с применением отечественной пленки ПМА показали, что все варианты электроизоляционных материалов обеспечивают примерно одинаковый ресурс работы изоляции. Наличие в лентах Элмикаимид и ЛСПМ слюдяной бумаги существенно повышает короностойкость пленки ПМ.

Опыт эксплуатации ТЭД класса F показал, что для того, чтобы иметь достаточный запас по электрической прочности в пазовой части якорной обмотки, необходимо предусмотреть дополнительную изоляцию катушек от корпуса. В системе класса Н для этого используется композиционный материал имидофлекс на основе полиимидной пленки. Однако гладкая поверхность полиимидной пленки, которая находится во внешнем слое имидофлекса, не создает достаточного сцепления в пазовой части после пропитки обмотки якоря.

В связи с этим для перспективных серий ТЭД разработан композиционный материал Синтофлекс, состоящий из полиимидной пленки, склеенной с одной или с двух сторон нетканой арамидной бумагой. Волокнистая структура арамидной бумаги после пропитки обмотки создает достаточно высокое сцепление в пазовой части якоря. Композиционный материал Синтофлекс 82 и 828 выпускается толщиной 0,15; 0,18 и 0,24 мм.

Основные показатели Синтофлекс 828 для номинальной толщины 0,15 мм	
Номинальная толщина, мм	0,15
Разрывная прочность при растяжении, Н/см, не менее	
долевом	100
поперечном	70
Относительное удлинение, % не менее	
долевое	12
поперечное	9
Стойкость к надрыву, Н, не менее	
долевому	200
поперечному	150
Пробивное напряжение, кВ, не менее	
в исходном состоянии	10
после перегиба	7

Высокие электрические свойства лент Элмикаимид и ЛСПМ в исходном состоянии и характеристики систем изоляции на их основе позволяют рекомендовать эти ленты взамен стекломикалент ЛМК-ТТ и ЛФК-ТТ при выпуске электродвигателей, работающих в экстремальных условиях эксплуатации.

Работая в направлении создания новых материалов, ЗАО «Элинар» расширил номенклатуру за счет выпуска ЭИМ класса нагревостойкости Н. В настоящее время ЗАО «Элинар» может обеспечить комплектную поставку ЭИМ класса Н для изготовления изоляции ТЭД. Рекомендации по применению этих материалов для коллекторных ТЭД приведены в табл.5.

По третьему направлению ведутся разработки слюдосодержащей ленты и кремнийорганического состава без растворителя. В качестве аналога были выбраны слюдосодержащая лента и компаунд фирмы «Вон Ролл Изола». Получены первые образцы отечественной ленты и компаунда, которые проходят соответствующие испытания в ВЭлНИИ.

Таблица 5

Наименование материала	Обмотка статора			Обмотка якоря
	Катушка добавочного полюса	Компенсационная катушка	Катушка главного полюса	
Полиимидная пленка с липким подслоем	Витковая изоляция	—	—	Витковая изоляция
Ленты Элмикаимид или ЛСПМ	Корпусная изоляция	Корпусная изоляция	Корпусная изоляция	Корпусная изоляция
Арамидный препрег	—	Межслойная изоляция	Межслойная изоляция	—
Коллекторный слюдо-пласт КИФЭ-Н	—	—	—	Межламельная изоляция
Синтофлекс 828	—	—	—	Пазовая коробка
Стеклотекстолит СТ-ЭТФ	—	—	—	Клин
Стеклобандажная лента ЛСБЭ-180	—	—	—	Бандаж

Опыт применения обмоточного провода со слюдосодержащей изоляцией

В.Н.МЕЛЕЩЕНКО, инж. (АО «Элсиб»), В.М.ПАК, канд.техн.наук (АО «Элинар»)

Приведены результаты опытно-промышленного внедрения высоковольтного обмоточного провода со слюдосодержащей изоляцией. Показаны результаты сравнительных испытаний изоляции катушек, изготовленных с применением обмоточного провода со слюдосодержащей лентой Кондуктофол и отечественного аналога лентой ЛСВП.

В электромашиностроении при изготовлении изоляции крупных электрических машин (КЭМ) применяют обмоточные провода со стекловолокнистой и эмалевостекловолокнистой изоляцией типа ПСД и ПЭТВСД, которые имеют относительно низкие значения пробивных напряжений. В соответствии с техническими условиями значения пробивных напряжений для проводов ПСД нормируются от 450—600 В в зависимости от сечения провода, а для проводов ПЭТВСД — 800—900 В.

Низкие значения пробивных напряжений проводов со стекловолокнистой изоляцией обусловливают необходимость наложения дополнительной изоляции из слюдосодержащих лент ЛСЭП-934 или ЛСУ при изготовлении обмоток высоковольтных электродвигателей. Это приводит к увеличению толщины изоляции и ухудшению технико-экономических показателей при изготовлении электродвигателей.

Известно, что ведущие электромашиностроительные фирмы применяют при изготовлении изоляции КЭМ обмоточные провода со слюдосодержащей изоляцией, наложенной непосредственно на медный провод.

В АО «Элсиб» проводилось опытно-промышленное внедрение провода марки ПК-155 со слюдосодержащей изоляцией из ленты Кондуктофол фирмы «Изовольта» для катушечных обмоток двигателей 2А3-550 на 6 кВ.

Лента Кондуктофол состоит из пленки ПЭТ-Э толщиной 0,04 мм и слоя слюдяной бумаги, склеенных термореактивным связующим. Общая толщина ленты 0,09 мм. При изготовлении обмоточного провода медный проводник изолируется слюдосодержащей

лентой без какой-либо подклейки. Поэтому для цементации витков в пазовых частях необходима промазка эпоксидным лаком, что явилось недостатком технологии изготовления проводов.

В табл.1 приведены электрические свойства ленты и провода с изоляцией Кондуктофол в исходном состоянии.

Данные в табл.1 показывают высокие значения пробивного напряжения изоляции провода со слюдосодержащей лентой в исходном состоянии. Известно, что при формировании катушек на витковую изоляцию воздействуют значительные механические усилия, которые могут привести к повреждению изоляции и, соответственно, к снижению пробивного напряжения. Для изучения этого фактора определялись изменения пробивного напряжения провода после воздействия механических усилий на провод, имитирующих процессы формирования катушек. Результаты этих испытаний приведены в табл.2.

Данные табл.2 позволили сделать вывод о том, что изоляция провода имеет запас электрической прочности, а высокая механическая прочность дает возможность выдерживать деформации при формовке катушек.

В АО «Элсиб» проводилось опытно-промышленное внедрение провода ПК-155 со слюдосодержащей изоляцией из ленты Кондуктофол для обмоток двигателей 2А3-550 на 6 кВ. Было изготовлено 150 комплектов обмоток с изоляцией монолит-2 и переработано около 70 т провода.

Катушки изготавливались на оборудовании, используемом в серийном производстве. Лодочки (заготовки катушек) наматы-

Таблица 1

Вид изоляции	Пробивное напряжение, кВ			Электрическая прочность, кВ/мм		
	мин.	сред.	макс.	мин.	сред	макс.
Лента Кондуктофол толщиной 0,09 мм в исходном состоянии	1,4	3,0	3,5	16	24	40
Медный провод 3,15×6,3 мм, изолированный лентой Кондуктофол в 2 слоя в 1/2 перекрытие. Толщина на сторону 0,35 мм	6,8	8,5	9,6	19	24,5	27

Таблица 2

Вид технологического воздействия на провод $3,15 \times 6,3$ мм. Толщина 0,35 мм.	$U_{\text{пр}}$, кВ	$U_{\text{пр.ср}}$, кВ	$E_{\text{пр.ср}}$, кВ/мм
После изгиба по узкой грани по радиусу 30 мм (имитация перехода пазовой части в лобовую)	6,5—9,0	8,3	23,8
После изгиба по узкой грани по радиусу 15 мм (имитация перехода пазовой части в лобовую)	5,7—9,1	8,2	23,3
После изгиба по узкой грани по радиусу 15 мм с кручением на 180° (имитация головок лобовых частей)	8,4—9,6	8,92	23,5
После пропитки компаундом и запечки при 120°C в течение 15 ч	7,4—10	9,36	26,73

вались без нанесения дополнительной изоляции. Изоляция провода служит одновременно витковой и секционной. При циркуляционных высоковольтных испытаниях примерно в 2 раза снизились пробои корпусной изоляции (с 4,8 до 2,4%) и межсекционной изоляции (с 5,8 до 3,1%). Пробоев витковой изоляции не было.

Таким образом, применение провода ПК-155 со слюдосодержащей изоляцией позволило повысить производительность при намотке лодочек (заготовка для катушки) более чем на 20% и снизить в 2 раза количество пробоев корпусной и межсекционной изоляции. Расчеты показывают, что при применении подобных проводов можно повысить коэффициент заполнения паза медью в среднем на 4—6%.

В последующие годы АО «Элинар» разработал и внедрил слюдосодержащую ленту с маркой ЛСВП, которая является аналогом ленты Кондуктофол. На основе ленты ЛСВП ВНИИКП разработал обмоточный провод ПЛС. Опытно-промышленные работы по внедрению обмоточного провода ПЛС проводились в АО «ВИПО» при Самарском кабельном заводе. Опытно-промышленная партия провода ПЛС для поставки в АО «Элсиб» была изготовлена сечением $3,15 \times 6,0$ мм. Провод был изолирован на обмоточной машине лентой ЛСВП шириной 20 мм из трех слоев с 30% перекрытием. Получена толщина изоляции на сторону 0,36 мм. Результаты испытаний провода ПЛС в состоянии поставки и после воздействия механических

усилий приведены в табл. 3.

После испытаний по пунктам 3 и 4 не было обнаружено надрывов и разрывов изоляции провода. Результаты испытаний показывают, что изоляция провода выдержала испытания. Технологические воздействия практически не снижают пробивное напряжение изоляции провода.

Изготовление натурных катушек проводилось на существующем в АО «Элсиб» оборудовании. Все операции выполнялись в соответствии с технологическим процессом изготовления катушек с изоляцией монолит-2. После каждой технологической операции изготовления катушек определялось пробивное напряжение витковой изоляции (табл. 4).

Таблица 4

Вид технологической операции	Напряжение пробоя, кВ		
	U_{min}	$U_{\text{ср}}$	U_{max}
Лодочки после запечки пазовой части	13,5	18,0	21,5
Катушки после формообразования	12,5	16,9	21,5
Катушки после пропитки и запечки	15,5	20,0	24,0

Анализ результатов испытаний провода ПЛС показал следующее:

— провод ПЛС имеет высокие пробивные напряжения ($11,5 \pm 1,2$) кВ при требовании не менее 3 кВ;

— геометрические размеры провода соответствуют требованиям ТУ, но находятся в максимальных размерах, так как применялась более широкая лента для намотки, что и способствовало образованию неровностей

Таблица 3

№№ п/п	Вид технологического воздействия на провод	Значения пробивного напряжения провода, кВ
1.	В состоянии поставки. Толщина изоляции 0,36 мм на сторону	11,5
2.	Между двумя проводами, параллельно расположенным и плотно прижатыми друг к другу на длине 200 мм (имитация пазовой части)	29
3.	Изгиб одинарного провода по стороне А на ребре вокруг стержня диаметром 60 мм и углом охвата 180° (имитация радиусной части катушки)	11,5
4.	Изгиб одинарного провода плашмя по стороне В вокруг стержня диаметром 30 мм (имитация головки лодочки и частично катушек)	10

Таблица 5

Тип изоляции	Толщина изоляции на сторону, мм	Пробивное напряжение, кВ	
		До пропитки	После пропитки и запечки по монолит-2
Лента ЛСЭП-934	0,4	8,5	10
Лента ЛСВП	0,36	11	17

поверхности изоляции;

— при изгибе провода вокруг стержней диаметром 30 и 60 мм видимых повреждений изоляции не обнаружено;

— испытания на натурных катушках (до пропитки) показали высокие пробивные межвитковые напряжения;

— после пропитки компаундом и запечки значения электрической прочности изоляции в головках и радиусных частях увеличились примерно в 1,5 раза.

В целом провод ПЛС на ленте ЛСВП может заменить провод ПК-155 на ленте Кондуктофол. Всего было изготовлено более 20 комплектов катушек статорной обмотки двигателя 4АЗМ-800 на 6 кВ.

Как было отмечено, для повышения пробивного напряжения витковой изоляции обмоточных провода со стекловолокнистой изоляцией дополнительно изолируется слюдоодержащей лентой ЛСЭП-934 или ЛСУ. Эта технология широко распространена на мно-

гих предприятиях при изготовлении обмоток высоковольтных электрических машин, в том числе в АО «Элсиб».

Сравнительные данные по электрической прочности витково-секционной изоляции, выполненной лентой ЛСЭП-934ТПл в два слоя вплюхлеста серийных катушек и катушек с изоляцией ЛСВП приведены в табл.5.

Видно, что изоляция из ленты ЛСВП имеет более высокие электрические характеристики. Планировалось внедрение провода ПЛС на серийных двигателях 4АЗМ-315÷1000 кВт/6000 В; 2АЗ-290/6000, 2АЗ-550/6000 В, а также на новых двигателях серии 2АДО с годовой потребностью 170 т.

Однако экономические расчеты, проведенные на стадии внедрения, показали, что стоимость 1 т провода ПЛС превысила стоимость провода ПСДТ с дополнительной витковой изоляцией из двух слоев ленты ЛСЭП-934ТПл. Поэтому внедрение провода ПЛС в АО «Элсиб» временно приостановлено.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

К моделированию электрополевой активации воды

Н.Н.КРАСИКОВ, академик АЭН

Приводится электрическая модель, связывающая электрополевую активацию воды с поляризацией жидкости по объемно-зарядовому типу.

Ранее [1] было установлено, что действие электрического поля высокого напряжения (ВН) на воду приводит к ее активации в отношении биологических объектов — семян различных растений. Такая вода становится эффективной при лечении простудных и аллергических заболеваний. Полученная после электрообработки жидкость становится более действенной в технологических процессах, например, при изготовлении силикатного кирпича.

Интерес, который вызвала эта работа, потребовал более подробного исследования электрической природы явления активации

воды. Было показано [2], что процесс бесконтактной электрообработки сочетает заряжение жидкости и поляризационные процессы, причем последним, по-видимому, можно отдать предпочтение.

В момент включения поля происходят поляризация молекул жидкости по деформационному и ориентационному типам, которые в рассматриваемом масштабе времени происходят мгновенно, поскольку время релаксации $\tau = \varepsilon_0 \varepsilon \rho$, где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ — электрическая постоянная; $\varepsilon \approx 80$ — диэлектрическая проницаемость; $\rho \approx 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ — удельное сопротивление воды.

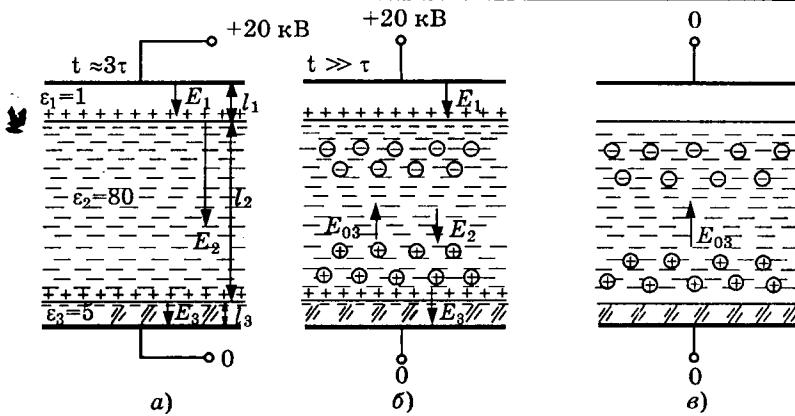


Рис.1. Модель трехслойного конденсатора на разных этапах действия электрического поля:

а — после окончания ориентационной поляризации молекул H_2O ; б — в процессе объемно-зарядовой поляризации; в — после отключения внешнего поля

Однако время электрополевой активации существенно больше и составляет минуты. Поэтому делается предположение о связи рассматриваемого процесса с объемно-зарядовой поляризацией по Поливанову [3]. Это касается приобретения жидкостью особых свойств в электрическом поле, что осуществляется через поверхностный слой, который способствует зарядению воды и объемно-зарядовой поляризации с возникновением разности потенциалов между верхней и нижней частями жидкости. В последнем случае возникает поляризационное поле обратной направленности по отношению к активирующему.

Эффект последействия проявляется биологической активностью воды, уменьшающейся со временем после отключения поля ВН. Причем ориентационная поляризация молекул H_2O разрушается после выключения действующего поля с тем же временем релаксации, что и при включении, т.е. мгновенно. Наоборот, активное состояние жидкости, связанное с объемно-зарядовым упорядочением, сохраняется в течение нескольких часов, причем релаксация объемно-зарядового поля помимо прочих факторов, связанных с электрическими свойствами жидкости, зависит от внутреннего сопротивления электрометрического вольтметра, фиксирующего поле. Кроме того, активное состояние уменьшается во времени тем резче, чем выше температура воды и больше ее минерализация [1]. В то же время показано [4], что спектроскопические методы, наиболее распространенные в подобных исследованиях, не имеют достаточной чувствительности, чтобы характеризовать относительно слабые поля, вызывающие биологически активное состояние воды. Отсюда следует положить, что с точки зрения физики явления активации

целесообразно рассматривать электрическую модель, в которой некоторые величины задаются и измеряются, а другие могут рассчитываться, исходя из представлений о трехслойном конденсаторе, когда электроды, задающие активирующее поле, отделяются от воды сверху — воздушной прослойкой, толщиной l_1 ($\epsilon_1 = 1$), снизу — диэлектрическим днищем ячейки l_3 ($\epsilon_3 = 5$). Слой воды ($\epsilon_2 = 80$) простирается между ними на расстояние l_2 .

Измеряемые в такой системе токи обычно не превосходят единиц микроампер и могут связываться с утечками и микропрополями в измерительной системе, поэтому токовой составляющей отводится подчиненное значение. Однако достоверно установлено заряджение жидкости от верхнего электрода, причем большее по модулю в случае, если он несет положительный потенциал [2].

В остальном, рассматривая электрическую модель явления, предпочтение отдаем зарядово-поляризационным процессам, сравнительно с электропроводностью настоящего трехслойного конденсатора. При этом целесообразно рассмотреть три следующих друг за другом этапа (рис.1).

Непосредственно после включения активизирующего поля $U = 20$ кВ по завершении ориентационной поляризации ($t \geq 3\tau$) происходит распределение поляризационных связанных зарядов и соответствующих напряженностей E_1 , E_2 , E_3 (рис.1, а). Рассчитанные значения потенциала ϕ представлены на рис.2 в виде прямой линии с изломами на границах раздела диэлектриков. При этом напряженность в воздушной прослойке E_1 близка к пробойной, в остальных средах она меньше E_1 в число раз, соответствующее диэлектрической проницаемости среды. Такое состояние применительно к жид-

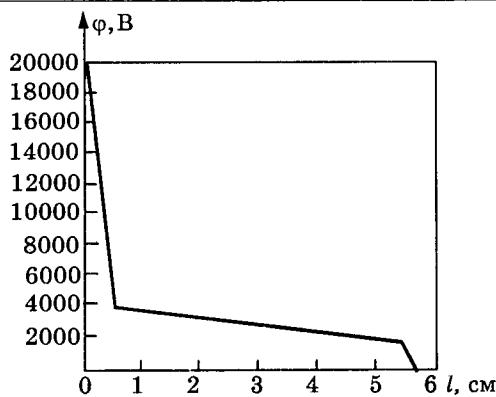


Рис.2. Распределение электрического потенциала ϕ внутри трехслойного конденсатора

кости конечной электропроводности не может оставаться статичным.

По мере нахождения воды в поле, в ней происходит перераспределение имеющихся электрических зарядов, перемещающихся в направлении, соответствующем уменьшению разности потенциалов на ее границах (рис.1,б), чему должно способствовать независимо происходящее электрическое заряжение верхней границы воды. Это ведет к появлению в жидкости дополнительной объемно-зарядовой напряженности E_{03} , имеющей направление, обратное действующему полю.

Формирование объемно-зарядовых структур в приграничных областях растягивает-

ся во времени, сопровождается локальным упорядочением электронейтральных молекул H_2O , имеющих дипольный момент, отражающий высокую полярность этой жидкости ($\epsilon_2 = 80$). Такой процесс по своей сути в пределе отражает основные признаки электретного состояния [5], релаксационно формирующегося в поле и уменьшающегося при отключении источника (рис.1,в), что ранее [1] было отмечено изменением возникающей разности потенциалов между электродами, погруженными в жидкость.

Таким образом, с определенной долей приближения электрическое последействие воды может связываться с трансформацией объемно-зарядовых форм в состояние, проявляющее признаки электрета, которое, в свою очередь, коррелируется с активацией жидкости в отношении живых организмов и технологий с водными системами.

Список литературы

1. Красиков Н.Н. Электрополевая активация воды //Электротехника. 1996. № 4. С.57—59.
2. Красиков Н.Н., Маренкова Т.М. Измерение электрического заряда жидкости при помощи электростатического вольтметра//Электротехника. 1997. № 10. С.60—61.
3. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч.3. М.: Энергия, 1969.
4. Антонченко В.Я., Давыдов А.С., Ильин В.В. Основы физики воды. Киев: Наукова думка, 1991.
5. Губкин А.Н. Электреты. М.: Наука, 1978.

ХРОНИКА

С 1 по 5 февраля 1999 г. в выставочном зале МЭО «Интерэлектро» состоялась 6-я специализированная международная выставка «Электротехническое оборудование», организаторами которой были МЭО «Интерэлектро» и МА «Интерэлектромаш». В выставке приняли участие более 25 фирм и предприятий из России, СНГ и зарубежных стран.

Отличительной особенностью данной выставки по сравнению с предыдущими было увеличение числа совместных предприятий и уменьшение иностранных участников.

Среди предприятий, представивших новые разработки, можно отметить следующие.

ЗАО «Мосэлектролинии», являющийся ведущим производителем в России по выпуску асинхронных электродвигателей трехфазных и однофазных мощностью 0,06—1,1 кВт и высотой оси вращения 56, 63, 71 мм. Значительную часть своей продукции отправляет на экспорт. Среди стран-экспортеров — Германия, Италия, Австрия, куда завод поставляет двигатели, использующиеся для привода газонокосилок, бетономешалок, насосов.

АО «Курс» представил электронный пускорегулирующий аппарат, предназначенный для зажигания и питания люминесцентных ламп от сети переменного и постоянного тока в быто-

вых и производственных помещениях. По сравнению со схемой зажигания (стартер и дроссель) электронный ПРА имеет следующие преимущества:

- экономия электроэнергии на 25—30%;
- мгновенное зажигание лампы без помех и искрения;
- отсутствие стробоскопического эффекта лампы (мерцания).

ОАО «Урал-Морган-Карбон» и Опытный завод электроугольных изделий представили новые электрощетки ЭГ61УМК, ЭГ84УМК, МГС22Н, ЭГ61М, ЭГ84М. Технология нового поколения щеток базируется на использовании собственного российского сырья, отличается от существующих стабильностью получаемых характеристик, улучшенными экологическими показателями. Эти разработки защищены патентами РФ на изобретения.

АО «Самарский трансформатор» первым из Российских предприятий в 1999 г. приступило к выпуску трансформаторов тока на 0,66 кВ с классом точности 0,5S и 0,2S, соответствующих международным стандартам и находящих применение за рубежом. Данные трансформаторы тока используются в схемах электроэнергии для расчета с потребителями. Они позволяют учитывать электроэнергию, начиная с 1% тока потребления в отличие от класса 0,5—5% и в 2,5 раза увеличивают точность измерения поставляемой электроэнергии.

АО «Электромаш» (Молдова) является одним из ведущих производителей взрывозащищенного электротехнического оборудования для нефтяной, газовой, угольной, химической промышленности. В номенклатуру завода входит электротехническое оборудование для горнодобывающей промышленности, энергетики и электробытовых изделий. Взрывозащищенные электродвигатели мощностью 0,25—2000 кВт отвечают всем современным требованиям и являются надежной основой электропривода в условиях взрывоопасных производств.

Особый интерес вызвали установочные и обмоточные провода марок ВПП и ПВДП для водопогружных насосов **АО «Подольсккабель»**. Заметный спрос был на силовой гибкий трехжильный кабель для электропитания водопогружных насосов.

ЗАО «Электробыт» — ведущий производитель России бытовой кабельной продукции — представило широкую гамму удлинителей, соединителей, адаптеров, изготавливаемых с

пользованием новых технологий и материалов.

Большим интересом у участников и посетителей вставки пользовался стенд **ОАО «Сафоновский электромашиностроительный завод»**:

— водонагреватели типа КЭПЗ и ЭПЗ, предназначенные для обогрева частных и производственных помещений площадью от 60 до 4000 м²;

— газовые воздухонагреватели типа ВГС, предназначенные для использования в система приточной вентиляции, воздушного отопления, тепловых завесах промышленных зданий, а также в сушильных установках для подогрева воздуха;

— индукторные электродвигатели типа ДСИ и ДБИ, предназначенные для привода электромеханических приборов домашнего обихода (маслобоеек, тестомешалок и т.п.), для прямого привода веселки и даже тестосмесительной машины и других механизмов, требующих значительных врачающих моментов при низких частотах вращения.

Компания «АББ-Реле Чебоксары» представила новый сегмент «АББ Автоматизация».

Оборудование для АСУ ТП промышленных предприятий:

— открытые распределительные системы управления процессом (АББ Адвант Мастер, АББ Адвант МОД);

— широкий спектр программируемых логических контроллеров РТУ, МОД 30 тм, МОД-СЕЛЛ, АС 31Об.

Оборудование для АСУ ТП электрических станций:

— интеллектуальные датчики давления серии 600 Т;

— датчики контроля пламени горелки Сэйф флейм тмДФС.

Электропривод:

— электродвигатели всех типов мощностью 12 кВт—100 МСт;

— устройства плавного пуска асинхронных электродвигателей 4—800 кВт;

— частотно-регулируемый привод — 0,37 кВт — 100 МВт.

Предложены также оборудование для металлургии, горного дела, судов, робототехники и контрольно-измерительные приборы для технологических процессов (КИП).

А.М.Калошкин, советник Интерэлектро

Уважаемые господа!

ИНТЕРЭЛЕКТРО совместно с фирмой "ЭЛЕКТРО-Э" предлагает Вашему вниманию выставочную программу на 1999 г.

Для участников наших коллективных стендов действуют скидки.

Наименование выставки, ярмарки	Время и место проведения	Условия участия с учетом скидки (1 м ² стандартной застроенной площади), без учета НДС
Лужники приглашают	19-23 апреля, Лужники, Малая спортивная арена	Регистрационный сбор — 75 у.е. Российские участники — 85 у.е. Иностранные участники — 170 у.е.
Сварка и электротермия	27—30 апреля, ЛЕНЭКСПО г.Санкт-Петербург	Российские участники — 125 у.е. (рег.сбор — 150 у.е.) Иностранные участники — 200 у.е. (рег.сбор — 200 у.е.)
Связь-экспокомм-99 Павильон "ФОРУМ"	11—15 мая, Экспоцентр, Красная Пресня	Российские участники — 145 у.е. Иностранные участники — 450 у.е.
Секьюрити-Экспо-99	11—15 мая, Экспоцентр, Красная Пресня	Российские участники — 110 у.е. Иностранные участники — 330 у.е.
Энергетика и электротехника-99	11—14 мая, ЛЕНЭКСПО г.Санкт-Петербург	Российские участники — 130 у.е. (рег.сбор — 120 у.е.) Иност.участники — 220 у.е. (рег.сбор — 240 у.е.)
Евроэкспомебель-99	17—22 мая, Сокольники	200 у.е.
Медтехника-99	24—28 мая. Экспоцентр, Красная Пресня	Российские участники — 110 у.е. Иностранные участники — 195 у.е.
Электро-99	29 июня—03 июля, Экспоцентр, Красная Пресня	Российские участники — 125 у.е. Иностранные участники — 220 у.е.
Коттедж-99	5—9 июля, Экспоцентр, Красная Пресня	Российские участники — 130 у.е. Иностранные участники — 205 у.е.
Мир стекла-99	20—23 июля, Экспоцентр, Красная Пресня	Российские участники — 115 у.е. Иностранные участники — 195 у.е.
Химия-99	6—10 сентября, Экспоцентр, Красная Пресня	С июня 1999 г.
Стройиндустрия и архитектура-99	6-10 сентября, Экспоцентр. Красная Пресня	С июня 1999 г.
Экспогород-99	6-10 сентября, Экспоцентр, Красная Пресня	С июня 1999 г.
НЕВА-99	22—25 сентября, ЛЕНЭКСПО г.Санкт-Петербург	Российские участники — 125 у.е. (рег.сбор — 150 у.е.) Иностранные участники — 465 у.е. (рег.сбор — 220 у.е.)
Агропроммаш	4—8 октября, Экспоцентр, Красная Пресня	С июня 1999 г.
Банк и офис-99	18—22 октября, Экспоцентр, Красная Пресня	С июня 1999 г.
Информатика-99	18—22 октября, Экспоцентр, Красная Пресня	С июня 1999 г.
Реклама-99	1—5 ноября, Экспоцентр.	С июня 1999 г.

121099, Москва, 1-й Смоленский пер., 7, оф.405. Тел/факс 244-07-88

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Игорь Петрович Копылов

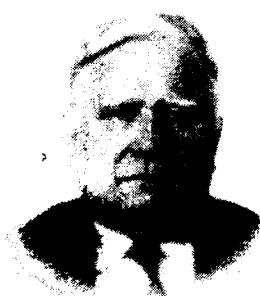
(к 75-летию со дня рождения)

28 апреля 1999 г. исполняется 75 лет доктору технических наук, почетному профессору кафедры "Электромеханика" Московского энергетического института (технического университета), заслуженному деятелю науки и техники Российской Федерации, Лауреату Государственной премии, крупному ученому — электромеханику, внесшему значительный вклад в теорию электромеханического преобразования энергии и практику электромашиностроения.

И.П.Копылов окончил МЭИ в 1952 г., в 1955 г. защитил кандидатскую, а в 1966 г. — докторскую диссертацию. В 1969 г. ему присвоено звание профессора. В 1970—1972 гг. И.П.Копылов работал проректором МЭИ по научной работе, с 1974 по 1989 гг. заведовал кафедрой электрических машин МЭИ — базовой кафедрой Минвуза России.

Профессор И.П.Копылов является выдающимся ученым и преподавателем. Им подготовлено 60 кандидатов и 5 докторов технических наук. Под его руководством прошли стажировку и повышение квалификации сотни преподавателей вузов России и зарубежных стран.

Талантливый ученый и изобретатель, Игорь Петрович обогатил теорию электромеханики фундаментальными работами в области динамики электрических машин. Им создана теория обобщенного электромеханического преобразователя, позволяющая составить математические модели для любой электрической машины.



Преложено определение активной, реактивной, обменной мощности и энергетических показателей в переходных процессах. Он одним из первых применял вычислительные машины для решения задач электромеханики. Свои многочисленные работы в области динамики электрических машин обобщил в выдержанном три издания учебнике "Математическое моделирование электрических машин", за который в 1990 г. был удостоен Государственной премии.

Результаты его научной деятельности изложены в 450 печатных работах, в том числе 30 учебниках, учебных пособиях и монографиях. Его учебники переведены на английский, польский, китайский, чешский и болгарский языки. Вышедшие под его редакцией капитальные работы "Проектирование электрических машин" и "Справочник по электрическим машинам" (в двух томах) являются настольными книгами инженеров-электромехаников. И.П.Копылов имеет 110 авторских свидетельств. Им предложены двигатели — усилители, безредукторные тихоходные гидрогенераторы для беспло-

тических ГЭС, синхронизированные однофазные двигатели и другие оригинальные электромеханические преобразователи. Представляют большое значение работы по замене медных обмоточных проводов ферромагнитными.

Занимаясь поисками источников электроэнергии, он пошел к созданию наземных космических энергетических установок, использующих энергию динамических процессов в электрической машине планета Земля и обосновал новое научное направление в электромеханике — геоэлектромеханику. Его монографии "Электромагнитная Вселенная", "Электромеханика планеты Земля" и "Космоэнергетика России", вышедшие в последние годы, пользуются большим интересом ученых многих научных направлений.

И.П.Копылов ведет большую научно-организационную работу, являясь членом ряда ученых Советов и членом редколлегии журналов "Энергетика" (Изв. РАН), "Электротехника" и "Электромеханика" (Изв.вузов). Он избран Почетным академиком ИАР и АЭН России и членом-корреспондентом Международной инженерной академии.

И.П.Копылов — участник Великой Отечественной войны, награжден орденами Ленина, Отечественной войны, Красной Звезды и многими медалями.

Редакция журнала "Электротехника", коллеги и ученики сердечно поздравляют Игоря Петровича со славным юбилеем и желают здоровья и многих лет творческой работы.

Виктор Петрович Ефименко

(к 60-летию)

16 апреля 1999 г. исполняется 60 лет главному специальному Отделу электротехнической промышленности и приборостроения Департамента машиностроения Министерства экономики России Виктору Петровичу Ефименко.

В.П.Ефименко прошел большой трудовой путь. После окончания в 1957 г. технического училища три года работал монтажником телефонных станций в различных регионах Советского Союза. С 1959 по 1964 гг. служил в военно-морском флоте. После окончания службы поступил в Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта, который закончил с отличием в 1969 г. и был направлен на Московский электрозвод, где принимал участие в создании и внедрении серий различных энергетических реакторов для высоковольтных линий электропередач и серий специальных трансформаторов для электрометаллургии.



В 1978 г. В.П.Ефименко был переведен на работу в аппарат Министерства электротехнической промышленности СССР, где работал на различных должностях, связанных с созданием и внедрением нового электротехнического оборудования. Принимал участие в ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС.

После распада СССР В.П. Ефименко работал в Министерстве промышленности России, Российском комитете по

машиностроению и в настоящее время — в Министерстве экономики России куратором электротехнической промышленности. В сложных рыночных условиях В.П.Ефименко способствует созданию нового электротехнического оборудования. Под его руководством была разработана и реализована государственная целевая программа "Энергосберегающая электротехника".

В.П.Ефименко является лауреатом премии Совета Министров СССР, награжден государственными наградами.

Как представитель государства В.П.Ефименко участвует в управлении ряда электротехнических предприятий, является членом национального бюро от России в Международной организации "Интерэлектро".

Поздравляем В.П.Ефименко с юбилеем и желаем ему долгого здоровья, дальнейших творческих и производственных успехов.

ПОПРАВКА

В статье Острайко В.Н. "Синтез двухслойного адаптера крепежного магнита круглой формы" (Электротехника, 1999, № 1, с.33—35) формула (8) на с.34 должна иметь вид:

$$\frac{h_1(r)}{h} = \frac{1}{\beta-1} \left(\frac{\alpha r_0}{r} - 1 \right), \dots$$

Редактор отдела О.В. Кунавина
Научный редактор Л.А. Романова
Литературный редактор А.М. Мескина

Сдано в набор 11.01.99. Подписано в печать 23.02.99. Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 42

Макет выполнен и отпечатан в АООТ «Электропривод»
107078, Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, к. 3



ДОРОГА
DOROGA



Огромный успех выставки ДОРОГА '98
гарантирует коммерческую отдачу
Вашего участия в выставке ДОРОГА '99!

ДОРОГА '99

Москва, Манеж, 22-25 июня 1999 года



Основные разделы выставки:

- Инвестиции в программы дорожного строительства.
- Геоинформационные системы и проектирование дорог.
- Машины, оборудование и технологии для строительства, ремонта и содержания дорог и дорожных комплексов.
 - Мосты, путепроводы и тоннели.
 - Дорожная техника.
 - Придорожный и автомобильный сервис.
 - Экология.
 - Обеспечение безопасности движения.
 - Спецодежда.
 - Наружная реклама, пресса, специальная литература.

Официальная поддержка:

- Правительство Москвы . Федеральная дорожная служба . ГИБДД МВД РФ .
- Госстрой России .

Принимаются заявки на участие:
т/ф (095) 2921136, 9592344, 9592362; E-mail: m-expo@cityline.ru



Федеральная
Дорожная
Служба
России

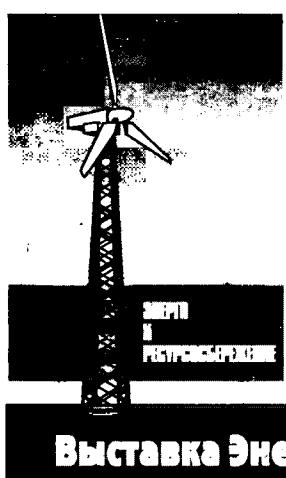


ВЫСТАВКА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ

Индекс
71111



2-4 апреля
г. Оренбург

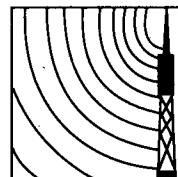


Приглашаем
к участию
всех
заинтересованных
в
Выставка Энерго и Ресурсосбережение

Справки по тел.: (3532) 77-55-98, 77-55-88, 77-55-75 ОАО "УралЭкспо"



ОАО "ТЮМЕНСКАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
ЯРМАРКА"



Приглашает Вас с 13 по 16 апреля 1999 г. принять участие в
специализированных выставках

~~ЭЛЕКТРОНИКА и СОСТАВЛЯЮЩИЕ ДЛЯ ТЭК~~

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ХХI ВЕКА:
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ, БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ

В программе выставки:

- системы автоматизации нефтепромыслов;
- контрольно-измерительная аппаратура для объектов нефтедобычи, транспортировки и переработки;
- электронно-вычислительные средства;
- информационные системы и оргтехника;
- системы и аппаратура передачи данных, коммутационное оборудование;
- радиоэлектронные компоненты и материалы;
- средства телевидения и радиовещания.

В программе выставки:

- электроэнергетика;
- теплоэнергетика;
- альтернативные источники энергии.

Телефон: (3452) 31-01-88, 31-02-77;
Телефакс: (3452) 31-00-78, 32-11-65.

Адрес: Россия, 625013, г. Тюмень,
ул. Севастопольская, 2, Выставочный зал

ISSN 0013-5860 Электротехника. 1999. № 3. 1-64