

вода (табл. 1 и 4) дает основание сделать вывод о том, что СПК для исследованных длин (табл. 4), мощностей и напряжения 0,85 кВ по капитальным затратам (при отсутствии  $\Gamma_{\text{экс}}$  и  $Z_{\text{пр}}$ ) конкурентоспособен и целесообразен к применению в системах электроснабжения крупных электроемких производств. При этом сечение одного полюса уменьшается почти в 12 тыс. раз, потери мощности и энергии падают до нуля, а плотность тока соответственно возрастает более чем в 12 тыс. раз (табл. 4). При увеличении потребляемой мощности от 140 до 175 МВт при длине СПК до 200 м капзатраты и годовые эксплуатационные расходы не изменяются, значит есть возможность передавать повышенную мощность за счет увеличения плотности тока до 682,63 кА/см<sup>2</sup> при неизменном сечении сверхпроводника, равном 0,3016 см<sup>2</sup>. При этом приведенные затраты возрастают только на 3,5 %, а капвложения в СПК меньше чем в жесткий шинопровод на 24 %. Соответственно, удельная расчетная стоимость 1 кВт·ч потребленной электроэнергии и себестоимость передачи электрической энергии уменьшаются (табл. 4).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехнический справочник /Под общ. ред. П.Г.Грудинского, Г.Н.Петрова, М.М.Соколова и др. — 4-е изд., перераб. — М.: Энергия, 1972. Т. 2, кн. 2, с. 747—748. 2. Семчинов А.М. Токопроводы промышленных предприятий. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергия, 1972, с. 17—24. 3. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Промышленные электрические сети/Под общ. ред. А.А.Федорова и Г.В.Сербиновского. — М.: Энергия, 1980, с. 77—87. 4. Методические материалы по технико-экономическому анализу надежности. — Л.: 1980, с. 11—12. — 65 с. 5. Бережной А.В., Федин В.Т. Криогенные электропередачи. — Минск: БПИ, 1977. — 103 с. 6. Казовский Е.Я., Карцев В.П., Шахтарин В.Н. Сверхпроводящие магнитные системы. — Л.: Наука, 1967, с. 246, 306.

УДК 621.313.2—544

В.Н.САЦУКЕВИЧ (БПИ)

### СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В реверсивных тиристорных приводах постоянного тока с шунтирующими вентилями, к которым не предъявляются жесткие требования в отношении быстродействия, реверс электродвигателей осуществляется изменением направления магнитного потока. При этом ток динамического торможения протекает через шунтирующий вентиль [1]. Одним из таких приводов является электропривод оптико-обрабатывающих станков. В них якорь электродвигателя питается от индивидуального преобразователя с шунтирующей

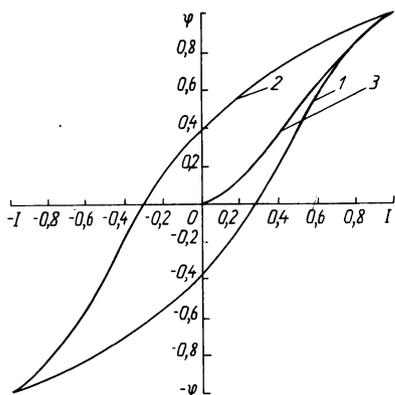


Рис. 1. Динамическая петля гистерезиса двигателя ПБСТ-23: 1 — восходящая ветвь; 2 — нисходящая ветвь; 3 — кривая намагничивания при включении обмотки возбуждения.

щим вентилем, а обмотка возбуждения — через реверсор, выполненный на тиристорах с емкостной коммутацией [ 2 ] .

Для анализа режима динамического торможения двигателя постоянного тока [ 3 ] необходимо знать закон изменения магнитного потока при изменении тока возбуждения. Использование статической кривой намагничивания приводит к существенным погрешностям, так как в этом случае не учитывается нелинейность магнитной цепи. Неоднородность магнитной цепи двигателя постоянного тока существенно осложняет задачу учета его нелинейности при реверсе. На рис. 1 приведена динамическая петля гистерезиса двигателя постоянного тока, которая была получена при его работе в режиме генератора. Зависимость интеграла эдс генератора по времени от тока возбуждения при постоянной частоте вращения в относительных величинах — это зависимость магнитного потока  $\varphi = \Phi/\Phi_n$  от тока возбуждения  $I = i_B/i_{Bn}$ .

Учитывая, что двигатель перемагничивается не по основной кривой намагничивания, а по соответствующей петле гистерезиса, необходимо получить аппроксимирующее выражение именно для нее. В [ 4 ] приводятся различные выражения для аппроксимации петли гистерезиса, но всем им свойствен один недостаток — они не дают аппроксимирующее выражение для ветви петли гистерезиса во всем диапазоне изменения тока возбуждения.

Как следствие этого, невозможно получить зависимость изменения индуктивности  $L$  обмотки возбуждения от значения тока в ней. Поэтому восходящую и нисходящую ветви петли гистерезиса, а также кривую изменения потока при включении обмотки возбуждения предлагается аппроксимировать кубической сплайн-функцией вида

$$\varphi(I) = \varphi_i + B_i(I - I_i) + C_i(I - I_i)^2 + D_i(I - I_i)^3 ,$$

где  $\varphi(I)$  — значение магнитного потока на данном интервале;  $B_i$ ,  $C_i$ ,  $D_i$  — коэффициенты аппроксимации сплайна;  $\varphi_i$  — значение магнитного потока в данном узле;  $n$  — число узлов сплайна;  $i =$

Таблица 1.

**Коэффициенты аппроксимации петли гистерезиса двигателя ПБСТ  
при  $n = 10$**

Восходящая ветвь петли гистерезиса			
Интервалы изменения тока	Коэффициенты		
	$B1_i$	$C1_i$	$D1_i$
от -1,00 до -0,95	0,141	1,220	-0,841
от -0,95 до -0,90	0,257	1,094	-4,608
от -0,90 до -0,29	0,331	0,403	-0,034
от -0,29 до 0,00	0,786	0,339	0,185
от 0,00 до 0,29	1,027	0,499	1,361
от 0,29 до 0,60	1,654	1,676	-3,601
от 0,60 до 0,95	1,648	-1,695	0,713
от 0,95 до 0,98	0,724	-0,946	-32,578
от 0,98 до 1,00	0,579	-3,878	-5,200

Нисходящая ветвь петли гистерезиса			
Интервалы изменения тока	Коэффициенты		
	$B2_i$	$C2_i$	$D2_i$
от -1,00 до -0,98	0,418	4,190	-5,200
от -0,98 до -0,95	0,579	3,878	-32,578
от -0,95 до -0,60	0,724	0,946	0,713
от -0,60 до -0,29	1,648	1,695	-3,601
от -0,29 до 0,00	1,654	-1,676	1,361
от 0,00 до 0,29	1,027	-0,499	0,185
от 0,29 до 0,90	0,786	-0,339	-0,034
от 0,90 до 0,95	0,331	-0,403	-4,608
от 0,95 до 1,00	0,257	-1,094	-0,841

Кривая намагничивания при включении обмотки возбуждения			
Интервалы изменения тока	Коэффициенты		
	$B3_i$	$C3_i$	$D3_i$
от 0,00 до 0,10	0,209	3,256	-3,524
от 0,10 до 0,30	0,755	2,199	-3,622
от 0,30 до 0,35	1,200	0,025	-0,520
от 0,35 до 0,40	1,198	-0,052	1,572
от 0,40 до 0,45	1,205	0,183	-5,769
от 0,45 до 0,70	1,180	-0,682	1,442
от 0,70 до 0,95	1,109	0,399	-3,035
от 0,95 до 0,98	0,740	-1,877	-19,460
от 0,98 до 1,00	0,575	-3,628	-6,904

$= 1, 2, \dots, n - 1$  — число интервалов;  $I$  — ток возбуждения, изменяющийся на каждом интервале от  $I_i$  до  $I_{i+1}$ .

Коэффициенты  $B_i, C_i, D_i$  определяются из [5] для каждого интервала.

В БПИ разработана программа SPLIN, позволяющая по заданным координатам узловых точек сплайна определить значения коэффициентов  $B_i, C_i, D_i$  и вычислить значения магнитного потока  $\varphi$  и его производной по току  $d\varphi/dI$  для любого значения тока возбуждения в зависимости от его направления (включение или реверс). В табл. 1 приводятся значения коэффициентов  $B_i, C_i, D_i$  при числе узловых точек  $n = 10$  для восходящей и нисходящей ветвей петли гистерезиса, а также для режима включения обмотки возбуждения. Погрешность аппроксимации не превышает 1,5 %.

Учитывая, что полученное аппроксимирующее выражение обеспечивает гладкость функции и ее производной во всем диапазоне изменения тока возбуждения, мы можем определить индуктивность обмотки возбуждения при включении и реверсе. Выражая магнитный поток и ток возбуждения в относительных величинах, можем записать

$$L = 2pW_{\text{ш}}\kappa_{\varphi} \frac{d\varphi}{dI} 10^{-8},$$

где  $p$  — число пар полюсов;  $w_{\text{ш}}$  — число витков обмотки возбуждения;  $\kappa_{\varphi} = \Phi_{\text{н}}/i_{\text{вн}}$  — коэффициент, определяемый из кривой намагничивания машины при номинальном токе возбуждения;  $\Phi_{\text{н}}$ ,  $i_{\text{вн}}$  — соответственно номинальный магнитный поток и номинальный ток возбуждения.

На рис. 2 приведена зависимость  $L = f(I)$  при включении обмотки возбуждения и реверсе, которые позволяют учесть изменение индуктивности обмотки возбуждения в динамике при анализе режима динамического торможения. Результаты аппроксимации

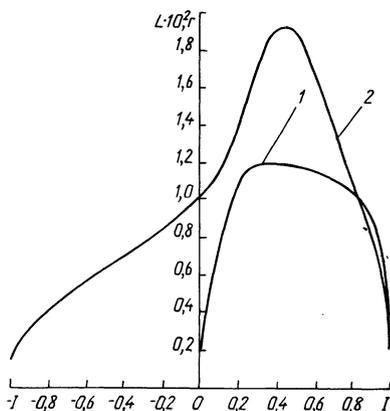


Рис. 2. Индуктивность обмотки возбуждения двигателя ПБСТ-23: 1 — при включении; 2 — при реверсе; ток  $I$  изменяется от  $-1$  до  $1$ .

динамической петли гистерезиса двигателя постоянного тока были использованы при расчете режима динамического торможения двигателя типа ПБСТ на ЭВМ "Минск-32". В результате расчетов определено время динамического торможения двигателя, которое согласуется с временем торможения, полученным экспериментальным путем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анхимюк В.Л., Михеев Н.Н., Сацукевич В.Н. Тиристорный электропривод оптико-обрабатывающих станков с реверсором в цепи возбуждения двигателя. — В кн.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск: Выш. шк., 1975, вып. 2, с. 174—181. 2. Иванчук Б.Н., Липман Р.А., Рувинов Б.Я. Тиристорные усилители постоянного тока. — М.: Энергия, 1964. — 96 с. 3. Анхимюк В.Л., Михеев Н.Н., Сацукевич В.Н. Реверсивный тиристорный электропривод с динамическим торможением. — В кн.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск: Выш. шк., 1977, вып. 4, с. 112—115. 4. Филиппов Е. Нелинейная электротехника. — М.: Энергия, 1976. — 495 с. 5. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. — М.: Мир, 1980. — 280 с.

УДК 621.133.1

Г.И.ЖИХАР, канд.техн.наук,  
А.И.ЦИТВАРИС, П.В.ЖИЛИН (БПИ)

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В ЦИКЛОННОЙ КАМЕРЕ

При оптимальном процессе горения необходимо соблюдать условие, что доля сепарированного топлива на стенке циклонной камеры  $q_c$  соответствует доле топлива, которое может сгореть на стенке по условиям диффузии кислорода  $b_d$ , т.е. необходимо соблюдать равенство  $q_c = b_d$ .

Если горение топлива на стенке циклонной камеры протекает до образования  $CO$ , то в этом случае на ней будет гореть по условиям подвода окислителя максимальная доля топлива, т.е.  $b_d = b_d^{\max}$ . Если на стенке циклонной камеры горение топлива идет до равного образования  $CO$  и  $CO_2$ , то на стенке камеры будет сгорать топливо по условиям подвода окислителя, равное  $b_d = b_d^{\text{расч}}$ .

Горение сепарированного топлива на стенке камеры до полного его сгорания маловероятно. В этом случае доля топлива, сгоревшего на стенке камеры по условиям диффузии окислителя, будет минимальной, т.е.  $b_d = b_d^{\min}$ .

Следовательно, циклонная камера будет работать в оптимальном режиме тогда, когда доля сепарированного топлива  $q_c$  будет лежать в пределах  $b_d^{\text{расч}} < q_c < b_d^{\max}$ .