

УДК 621.316.79:621.313.333

ГРАДИЕНТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов, М.А. Глазко

Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово

E-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

Показаны особенности регулирования электромагнитных моментов асинхронных электродвигателей в составе многодвигательного электропривода. Приведены исследования влияния отклонения параметров одного из двигателей на суммарный момент многодвигательного электропривода. На основе метода скоростного градиента предложен способ управления таким электроприводом и рассмотрены показатели регулирования. Продемонстрирована работоспособность предложенного способа управления с учетом особенностей преобразователя частоты. Даны рекомендации по выбору способа градиентного управления многодвигательным электроприводом.

Ключевые слова:

Многодвигательный асинхронный электропривод, изменяющиеся параметры, частотное управление, регулирование электромагнитного момента, метод скоростного градиента.

Key words:

Multimotor asynchronous drive, changing parameters, frequency control, control of electromagnetic torque, high-speed gradient technique.

На многих современных производствах необходимы асинхронные электроприводы большой мощности. С целью снижения габаритов такие электроприводы делают многодвигательными, в частности для электроприводов горных машин, установленная мощность которых варьируется в пределах от десятков до тысяч кВт, распространено применение двухдвигательной схемы [1].

С учетом фактора многодвигательности, задача построения высокоомощного регулируемого асинхронного электропривода приобретает особые аспекты, связанные с необходимостью обеспечивать согласование значений электромагнитного момента, развиваемого каждым из двигателей. Это вызвано тем, что электродвигатели даже одной и той же марки имеют различные параметры. Помимо этого, двигатели, работающие в одном электроприводе, могут иметь различные условия работы, например условия охлаждения, что дополнительно будет оказывать влияние на параметры отдельных двигателей многодвигательного привода, воздействуя тем самым на режим работы привода в целом [2]. Так, изменение момента одного из двигателей многодвигательного электропривода относительно требуемого значения приводит к изменению суммарного момента электропривода, определяющего движение исполнительного органа, ухудшая тем самым качество регулирования его работы, как в статических, так и в динамических режимах. Исходя из этого, основная задача построения регулируемого многодвигательного асинхронного электропривода заключается в организации такого способа управления электродвигателями, при котором на требуемом уровне поддерживается суммарный момент электропривода.

При решении этой задачи важным условием является способ подключения электродвигателей к электрической сети. В общем случае возможно два варианта подключения асинхронного двигателя (АД), рис. 1. В первом случае (рис. 1, а) каждый из

двигателей питается от своего преобразователя частоты (ПЧ), в то время как во втором (рис. 1, б) один преобразователь частоты управляет группой электродвигателей.

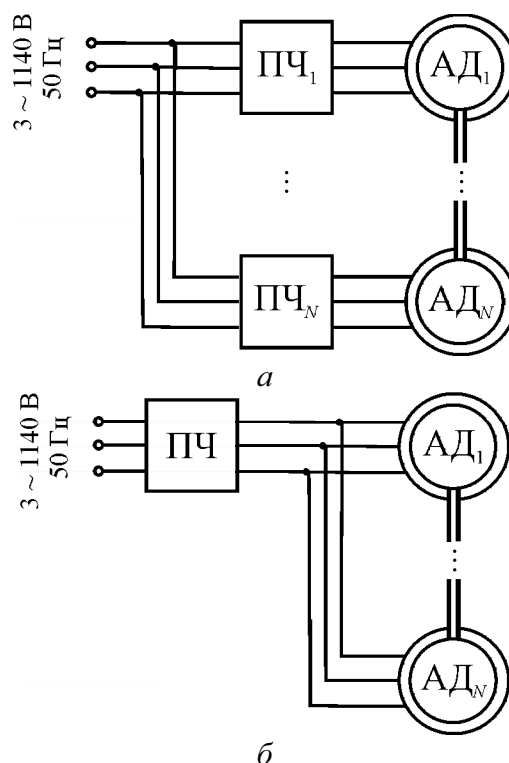


Рис. 1. Варианты подключения многодвигательного асинхронного электропривода к сети электроснабжения: а) индивидуальное; б) групповое

При наличии индивидуального ПЧ, двигатели многодвигательного электропривода можно рассматривать как электрически не связанные объекты, для управления электромагнитными моментами которых можно использовать любой из известных способов регулирования момента АД. В этом

случае электромагнитные моменты окажутся согласованными даже в случае несовпадения параметров двигателей. Однако при групповом подключении двигателей к одному преобразователю частоты, асинхронные двигатели оказываются связанными не только механически, но и электрически, вследствие чего несовпадение параметров АД может существенно повлиять на качество управления.

Рассмотрим вариант регулирования электромагнитного момента асинхронного двигателя при помощи градиентного управления [3], согласно которому напряжение статора необходимо изменять по закону:

$$\begin{aligned} u_{1\alpha} &= -\gamma \int \left(-\frac{M - M^*}{M_H} \psi_{1\beta} + \frac{\psi_1^2 - \psi_1^{*2}}{\psi_{1H}^2} \psi_{1\alpha} \right) dt; \\ u_{1\beta} &= -\gamma \int \left(\frac{M - M^*}{M_H} \psi_{1\alpha} + \frac{\psi_1^2 - \psi_1^{*2}}{\psi_{1H}^2} \psi_{1\beta} \right) dt, \end{aligned} \quad (1)$$

где $u_{1\alpha}, u_{1\beta}$ – составляющие вектора напряжения, подводимого к статору АД, в неподвижной системе координат $\alpha-\beta$; $\psi_{1\alpha}, \psi_{1\beta}$ – составляющие вектора потокосцепления статора; ψ_1, ψ_1^* – текущее и заданное значения модуля вектора потокосцепления статора; M, M^* – текущий и заданный электромагнитные моменты двигателя; M_H – номинальный момент двигателя; ψ_{1H} – номинальное значение модуля вектора потокосцепления статора; γ – коэффициент усиления.

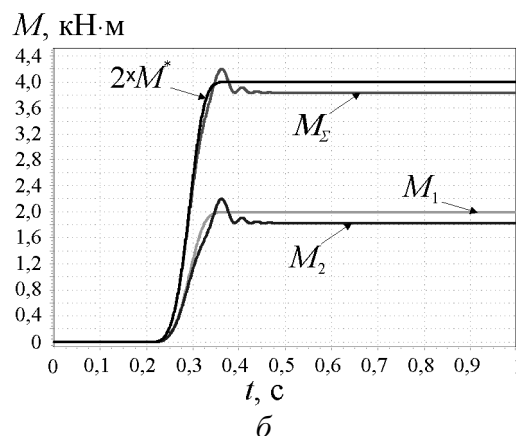
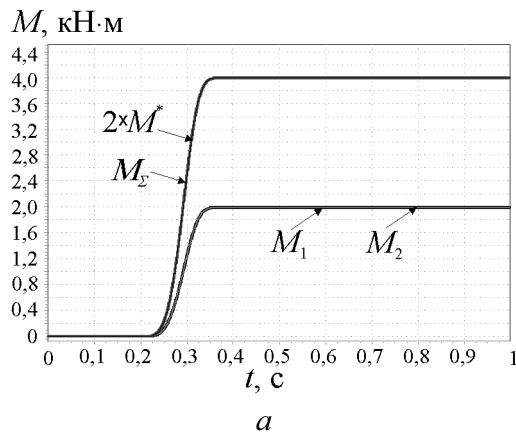


Рис. 2. Моменты многодвигательного электропривода при: а) равных параметрах эталонного и испытуемого двигателей; б) увеличении R_2 испытуемого двигателя на 10 %

Исследование влияния неравенства одноименных параметров двигателей на качество регулирования их электромагнитных моментов по закону (1) проведем методом компьютерного моделирования. В данном вычислительном эксперименте в качестве приводных двигателей будем использовать взрывозащищенные асинхронные электродвигатели марки ДКВ355L4, работающие на один вал и управляемые при помощи одного преобразователя частоты. При этом в качестве обратных связей в (1) будем использовать переменные одного двигателя, принятого эталонным, а параметры второго, принятого испытуемым, будем варьировать в пределах погрешности ± 20 %.

Полученные результаты позволяют судить о том, что изменение параметров одного из двигателей многодвигательного электропривода не приводит к искажениям переходных процессов в эталонном двигателе, но вызывает статические и динамические ошибки электромагнитного момента испытуемого двигателя и, как следствие, суммарного момента электропривода M_Σ . Например, при увеличении активного сопротивления ротора двигателя R_2 на 10 % статическая ошибка по M_Σ составила 4,36 %, а максимальная динамическая ошибка 7,23 %, что проиллюстрировано на рис. 2.

Полное представление о влиянии каждого параметра на показатели регулирования отражается в сводных таблицах. Так, в табл. 1 показано индивидуальное влияние каждого из параметров испытуемого электродвигателя.

Таблица 1. Влияние отклонения параметров на показатели регулирования момента многодвигательного электропривода, управляемого по закону (1)

Изменяющийся параметр		Показатель регулирования, %					
		δ_1	σ_1	δ_2	σ_2	δ_Σ	σ_Σ
R_1	± 5 %	0,2	0,65	0,11 -0,06	11,21 -12,39	0,07 -0,02	5,66 -6,20
	± 20 %			0,36 -0,31	38,18 -58,46	0,19 -0,14	19,13 -29,23
R_2	± 5 %			4,56 -4,96	7,42 -7,72	2,29 -2,47	3,79 -3,89
	± 20 %			15,99 -23,37	26,92 -32,47	8,01 -11,67	13,54 -16,27
$L_{\sigma 1}$	± 5 %			0,28 -0,23	2,69 -2,53	0,15 -0,10	1,67 -1,45
	± 20 %			1,06 -0,98	8,36 -9,53	0,54 -0,48	4,50 -4,96
$L_{\sigma 2}$	± 5 %			0,10 -0,05	2,28 -2,07	0,06 -0,01	1,47 -1,23
	± 20 %			0,34 -0,26	6,87 -7,52	0,18 -0,11	3,76 -3,95
L_{12}	± 5 %			-0,13 0,19	-2,63 2,95	-0,05 0,11	-1,33 1,53
	± 20 %			-0,52 0,84	-9,22 13,40	-0,25 0,43	-4,62 6,75

* R_1, R_2 – активные сопротивления статора и ротора соответственно; $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ – индуктивности рассеяния статора и ротора соответственно; L_{12} – взаимная индуктивность двигателя.

** $\delta_1, \delta_2, \delta_\Sigma$ – статическая ошибка регулирования электромагнитного момента эталонного двигателя, испытуемого двигателя и суммарного момента электропривода; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_\Sigma$ – максимальная динамическая ошибка регулирования электромагнитного момента эталонного двигателя, испытуемого двигателя и суммарного момента электропривода.

Аналогичные данные получены для всех сочетаний вариаций параметров в пределах заданной погрешности и позволяют судить, о том, что наибольшее статическое и динамическое отклонение суммарного момента электропривода M_Σ возникает вследствие совокупного уменьшения сопротивлений статора R_1 и ротора R_2 испытуемого двигателя. Следует отметить, что при практической эксплуатации электроприводов такая ситуация является весьма вероятной, поскольку изменение условий охлаждения влияет как на параметры статора АД, так и на параметры ротора.

Полученные результаты показывают, что для эффективного применения многодвигательного электропривода закон (1) требует модернизации с учетом работы каждого из двигателей. Чтобы получить закон управления суммарным моментом нескольких АД, питающихся от одного автономного инвертора напряжения, на базе градиентного управления моментом необходимо представить математическую модель нескольких асинхронных электродвигателей, работающих на один вал, в матричном виде:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{t}) + \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{t})\mathbf{u},$$

где $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_i \dots \mathbf{x}_n]^T$ – вектор состояния; $\mathbf{x}_i = [\psi_{1\alpha i}, \psi_{1\beta i}, \psi_{2\alpha i}, \psi_{2\beta i}, \omega]^T$ – вектор состояния i -го двигателя; $\mathbf{u}_i = [u_{1\alpha}, u_{1\beta}]^T$ – вектор управляющих воздействий; $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{t}) = [\mathbf{A}_1 \dots \mathbf{A}_i \dots \mathbf{A}_n]^T$ – переходная матрица состояния;

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} -\sigma_i L_{2i} R_{1i} \psi_{1\alpha i} + \sigma_i L_{12i} R_{1i} \psi_{2\alpha i} \\ -\sigma_i L_{2i} R_{1i} \psi_{1\beta i} + \sigma_i L_{12i} R_{1i} \psi_{2\beta i} \\ \sigma_i L_{12i} R_{2i} \psi_{1\alpha i} - \sigma_i L_{1i} R_{2i} \psi_{2\alpha i} - p_i \omega \psi_{2\beta i} \\ \sigma_i L_{12i} R_{2i} \psi_{1\beta i} - \sigma_i L_{1i} R_{2i} \psi_{2\beta i} + p_i \omega \psi_{2\alpha i} \\ \frac{1}{J} \left(\sum_{i=1}^n p_i \sigma_i L_{12i} (\psi_{1\beta i} \psi_{2\alpha i} - \psi_{1\alpha i} \psi_{2\beta i}) - M_c \right) \end{bmatrix};$$

i – индекс, показывающий отношение переменной или параметра к i -му двигателю; $L_1 = L_{12} + L_{\sigma 1}$, $L_2 = L_{12} + L_{\sigma 2}$ – полные индуктивности статора и ротора соответственно; $\sigma = 1/(L_1 L_2 - L_{12}^2)$ – коэффициент рассеяния двигателя; p – число пар полюсов; J – суммарный момент инерции многодвигательного электропривода; M_c – нагрузка, преодолеваемая электроприводом; $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{t}) = [\mathbf{B}_1 \dots \mathbf{B}_i \dots \mathbf{B}_n]^T$ – переходная матрица управления;

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

Учитывая, что целью управления является регулирование суммарного момента электропривода M_Σ и поддержание потокосцеплений каждого из n двигателей на заданном уровне, ее необходимо представить в виде локального целевого функционала:

$$Q(\mathbf{x}, \mathbf{t}) = 0,5[\mathbf{y}(\mathbf{t}) - \mathbf{y}^*(\mathbf{t})]^T \mathbf{H}[\mathbf{y}(\mathbf{t}) - \mathbf{y}^*(\mathbf{t})],$$

где $\mathbf{H}$ – матрица весовых коэффициентов; $\mathbf{y}(\mathbf{t}) - \mathbf{y}^*(\mathbf{t})$ – вектор регулируемых величин, который записывается в виде:

$$\mathbf{y}(\mathbf{t}) - \mathbf{y}^*(\mathbf{t}) = [(\mathbf{y}_1(\mathbf{t}) - \mathbf{y}_1^*(\mathbf{t})) \dots (\mathbf{y}_i(\mathbf{t}) - \mathbf{y}_i^*(\mathbf{t})) \dots (\mathbf{y}_n(\mathbf{t}) - \mathbf{y}_n^*(\mathbf{t}))]^T,$$

для которого отдельные составляющие выражаются через переменные состояния как:

$$[\mathbf{y}_i(\mathbf{t}) - \mathbf{y}_i^*(\mathbf{t})] = \begin{bmatrix} [p_i \sigma_i L_{12i} (\psi_{1\beta i} \psi_{2\alpha i} - \psi_{1\alpha i} \psi_{2\beta i}) - M_i^*(t)] \\ [\psi_{1\alpha i}^2 + \psi_{1\beta i}^2 - \psi_{1i}^{*2}(t)] \end{bmatrix}.$$

В результате применения алгоритма скоростного градиента [4] для указанного локального целевого функционала и приведенной выше модели многодвигательного асинхронного электропривода получим зависимость, определяющую значения составляющих вектора напряжения на выходе ПЧ, необходимые для достижения поставленной цели управления:

$$u_{1\alpha} = -\gamma \int \sum_{i=1}^n h_i \times \left(\frac{p_i \sigma_i L_{12i} (p_i \sigma_i L_{12i} (\psi_{1\beta i} \psi_{2\alpha i} - \psi_{1\alpha i} \psi_{2\beta i}) - M_i^*)}{M_{Hi}} \psi_{2\beta i} + \frac{\psi_{1\alpha i}^2 + \psi_{1\beta i}^2 - \psi_{1i}^{*2}}{\psi_{1Hi}^2} \psi_{1\alpha i} \right) dt;$$

$$u_{1\beta} = -\gamma \int \sum_{i=1}^n h_i \times \left(\frac{p_i \sigma_i L_{12i} (p_i \sigma_i L_{12i} (\psi_{1\beta i} \psi_{2\alpha i} - \psi_{1\alpha i} \psi_{2\beta i}) - M_i^*)}{M_{Hi}} \psi_{2\alpha i} + \frac{\psi_{1\alpha i}^2 + \psi_{1\beta i}^2 - \psi_{1i}^{*2}}{\psi_{1Hi}^2} \psi_{1\beta i} \right) dt.$$

где h_i – весовые коэффициенты, определяющие важность регулирования электромагнитного момента i -го электродвигателя.

В силу громоздкости данного уравнения, и также учитывая необходимость в получении информации о составляющих векторов потокосцепления ротора каждого АД в режиме реального времени, применять его на практике в приведенном виде затруднительно. Чтобы избежать указанных недостатков примем ряд допущений, подробно изложенных в [3], с учетом которых закон градиентного управления моментом многодвигательного асинхронного электропривода примет вид:

$$u_{1\alpha} = -\gamma \int \left(\sum_{i=1}^n h_i \left(\frac{M_i - M_i^*}{M_{Hi}} \psi_{1\beta i} + \frac{\psi_{1i}^2 - \psi_{1i}^{*2}}{\psi_{1Hi}^2} \psi_{1\alpha i} \right) \right) dt;$$

$$u_{1\beta} = -\gamma \int \left(\sum_{i=1}^n h_i \left(\frac{M_i - M_i^*}{M_{Hi}} \psi_{1\alpha i} + \frac{\psi_{1i}^2 - \psi_{1i}^{*2}}{\psi_{1Hi}^2} \psi_{1\beta i} \right) \right) dt. \quad (2)$$

Для проверки работоспособности полученного закона управления методом компьютерного моде-

лирования проведем исследования, аналогичные описанным выше для закона управления (1). При моделировании так же будем использовать взрывозащищенные асинхронные электродвигатели марки ДКВ355L4, работающие на один вал и управляемые при помощи одного преобразователя частоты.

Сводные результаты влияния индивидуальных отклонений параметров в пределах погрешности $\pm 20\%$ на качество регулирования суммарного момента электропривода M_Σ приведены в табл. 2. Они, так же как и проведенные исследования влияния группового изменения параметров, позволяют заключить, что, несмотря на наличие статических и динамических ошибок регулирования электромагнитного момента каждого из двигателей, ошибки регулирования суммарного момента электропривода не выходят за пределы 3% . Для иллюстрации данного утверждения на рис. 3 представлены результаты моделирования работы двухдвигательного электропривода, управляемого по закону (1) при совокупном увеличении сопротивлений статора R_1 и ротора R_2 испытуемого двигателя на 10% . Как можно видеть на рис. 3, а, динамическая ошибка регулирования моментов каждого двигателя лежит в пределах $\pm 6,5\%$, статическая ошибка — в пределах $\pm 5\%$, в то время как ошибки регулирования суммарного момента электропривода M_Σ визуально практически не различимы.

Таблица 2. Влияние отклонения параметров на показатели регулирования момента многодвигательного электропривода, управляемого по закону (2)

Изменяющийся параметр		Показатель регулирования, %					
		δ_1	σ_1	δ_2	σ_2	δ_Σ	σ_Σ
R_1	$\pm 5\%$	-0,03 0,06	-5,72 6,12	0,06 -0,03	5,77 -6,06	0,01 0,01	0,58 0,69
	$\pm 20\%$	-0,16 0,18	-20,89 26,24	0,18 -0,16	20,98 -26,17	0,02 0,02	-0,87 -1,29
R_2	$\pm 5\%$	-2,30 2,44	-3,72 3,97	2,32 -2,42	3,67 -4,0	0,01 0,01	0,59 0,59
	$\pm 20\%$	-8,59 10,55	-13,39 16,78	8,64 -10,51	12,30 -18,87	0,02 0,02	-0,74 -1,29
$L_{\sigma 1}$	$\pm 5\%$	-0,12 0,14	-1,53 1,63	0,14 -0,11	1,69 -1,46	0,01 0,01	0,67 0,58
	$\pm 20\%$	-0,52 0,52	-4,73 4,82	0,55 -0,49	4,84 -4,71	0,01 0,01	0,81 0,45
$L_{\sigma 2}$	$\pm 5\%$	-0,03 0,05	-1,29 1,41	0,05 -0,03	1,47 -1,25	0,01 0,01	0,65 0,58
	$\pm 20\%$	-0,15 0,16	-3,85 3,93	0,18 -0,14	3,93 -3,79	0,01 0,01	0,75 0,49
L_{12}	$\pm 5\%$	0,09 -0,07	1,38 -1,46	-0,07 0,09	-1,33 -1,51	0,01 0,01	0,59 0,61
	$\pm 20\%$	0,28 -0,39	4,66 -6,73	-0,26 0,42	-4,61 6,79	0,01 0,01	0,59 0,61

Следует отметить, что описанное качество регулирования суммарного момента многодвигательного электропривода сохраняется и при проведении вычислительных экспериментов с учетом особенностей работы преобразователя частоты, таких как вычислительная задержка формирования управляющего воздействия и широтно-импульсная мо-

дуляция напряжения, подводимого к статору электродвигателей, что продемонстрировано на рис. 3, б. Несмотря на наличие высокочастотной составляющей электромагнитных моментов обоих двигателей, огибающая графика переходного процесса суммарного момента M_Σ отличается от задания незначительно, что подтверждается также количественными данными, полученными при помощи цифровой фильтрации.

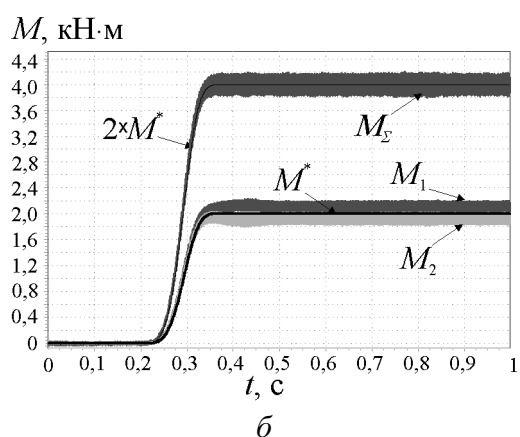
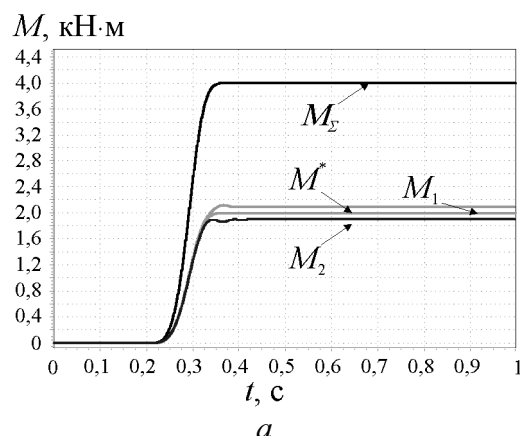


Рис. 3. Моменты многодвигательного электропривода при увеличении R_1 и R_2 испытуемого двигателя на 10% при: а) идеализированном ПЧ; б) учете особенностей ПЧ

Отдельно следует упомянуть, что предложенный закон управления (2) помимо описанных вычислительных экспериментов, в которых объектом выступал взрывозащищенный асинхронный электродвигатель, используемый в шахтовых электроприводах, подвергался также аналогичным исследованиям применительно к двигателю общепромышленного исполнения. Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что показатели регулирования суммарного момента многодвигательного электропривода в условиях изменяющихся параметров при выборе разных типов входящих в его состав электродвигателей качественно остаются одинаковыми.

Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать основные рекомендации по выбору способа градиентного управления многодвигательным асинхронным электроприводом в зависимости от требований, предъявляемых к качеству его работы:

1. При питании асинхронных двигателей многодвигательного электропривода от индивидуальных ПЧ для управления суммарным моментом привода можно использовать градиентное управление моментом АД по закону (1).
2. При групповом питании асинхронных двигателей от одного ПЧ, градиентное управление моментом АД по закону (1) рекомендуется применять только для многодвигательных электроприводов, в которых в силу экономичности си-

стемы управления контролируется состояние только одного двигателя, а разброс параметров АД не превышает 5...10 %.

3. Для многодвигательных асинхронных электроприводов с групповым подключением двигателей к преобразователю частоты высокого качества управления суммарным моментом привода при разбросе параметров АД в широком диапазоне можно добиться с применением закона (2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ещин Е.К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление. — Кемерово: КузГТУ, 2003. — 247 с.
2. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. — 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоиздат, 1981. — 576 с.

3. Завьялов В. М. Снижение динамических нагрузок в трансмиссиях горных машин. — Кемерово: КузГТУ, 2008. — 172 с.
4. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. — СПб.: Наука, 2003. — 208 с.

Поступила 25.06.2009 г.

УДК 621.313.333

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ СХЕМЫ ИСПЫТАНИЙ КРУПНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Е.В. Бейерлейн

Томский политехнический университет
E-mail: BeierleinEV@sibmail.com

Разработана схема взаимной нагрузки для проведения испытаний крупных асинхронных тяговых электродвигателей. Схема взаимной нагрузки позволит экономить электроэнергию в процессе испытаний и может быть использована на испытательных станциях крупных электрических машин подвижного состава.

Ключевые слова:

Схема испытаний, асинхронный тяговый электродвигатель, схема взаимной нагрузки, энергосбережение.

Key words:

Test pattern, induction traction motor, back-to-back circuit, energy saving.

Введение

Электрическая энергия имеет большое преимущество перед другими видами энергии: ее, возможно, передавать на большие расстояния, удобно распределять между потребителями, просто и с высоким коэффициентом полезного действия преобразовывать в другие виды энергии. В современных условиях ограничения природных ресурсов и постоянного повышения стоимости электрической энергии перед наукой стоит задача снижения энергопотребления путем внедрения энергосберегающих технологий.

В настоящее время в эксплуатации находятся сотни тысяч электрических машин (ЭМ) средней мощности до 1000 кВт, применяемые в качестве тяговых или вспомогательных машин. Многие из них выработали свой ресурс или приближаются к этому. Замена их новыми по разным причинам производится не достаточными темпами. Это увеличива-

ет число отказов ЭМ, объем ремонтных работ и соответственно затраты.

Современное состояние тяговых и вспомогательных электрических машин (ТЭД и ВЭМ) на железнодорожном транспорте характеризуется низкой надежностью, высокой аварийностью и средним фактическим сроком службы до ремонта не превышающем 600 тыс. км пробега. Это приводит к повышенным затратам на восстановление и к снижению безопасности перевозок. Имеются попытки повысить срок службы применением новых материалов и технологий, но они носят не системный характер, и решить проблему не могут. Для оценки ресурса ТЭД и ВЭМ нет методик, не организован мониторинг состояния электрических машин, без которого невозможно говорить об оценке остаточного ресурса, а значит о переходе на восстановительный ремонт по фактическому состоянию. Решение этой задачи актуально, так как старею-