

10. Karetnikov, V. V., and Yu. N. Andryushechkin. "Modeling of the topological structure of the zones of action of the control-correcting stations differential system GLONASS/GPS installed on the river Ob." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(20) (2013): 86–89.

11. Sikarev, A. A., V. V. Karetnikov, and Yu. N. Andryushechkin. "The basic aspects of the constructive approach to indemnification of zones of rupture of differential fields of MW on inland waterways of Russia." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsiy* 1 (2012): 112–115.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каретников Владимир Владимирович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_tss@gumrf.ru
spguwc-karetnikov@yandex.ru
Миляков Денис Федорович —
кандидат технических наук.
КБ «НАВИС»
denism@navis.spb.su
Милякова Яна Денисовна — аспирант.
Научный руководитель:
Каретников Владимир Владимирович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
Yana.Milyakova@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Karetnikov Vladimir Vladimirovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
kaf_tss@gumrf.ru
spguwc-karetnikov@yandex.ru
Milyakov Denis Fedorovich — PhD.
CD «NAVIS»
denism@navis.spb.su
Milyakova Yana Denisovna — postgraduate.
Supervisor:
Karetnikov Vladimir Vladimirovich.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
Yana.Milyakova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-192-202
УДК 621.396

А. В. Саушев,
Е. В. Бова

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ПОРТОВ И СУДОРЕМОНТНЫХ ЗАВОДОВ

Рассматривается задача параметрического синтеза систем управления электроприводах применительно к технологическим машинам береговых установок. Приводится обзор известных способов решения этой задачи. Анализируются показатели качества систем управления и способы построения критерия оптимальности. Исследуется типовая структурная схема электропривода технологических машин береговых установок, и решается задача параметрического синтеза по критерию запаса работоспособности. Рассматривается пример параметрического синтеза систем управления электропривода с регуляторами состояния, которые находят все более широкое применения на практике. Оптимальный по выбранному критерию результат сравнивается с решением, полученным при использовании обобщенного мультипликативного критерия оптимальности. Делается вывод о целесообразности применения в качестве критерия оптимальности при решении задачи параметрического синтеза систем управления электроприводов запаса работоспособности. Решение, полученное по данному критерию, гарантирует выполнение всех требований, предъявляемых к электроприводу, и обеспечивает его высокую параметрическую надежность.

Ключевые слова: электропривод, система управления, работоспособность, параметрический синтез, запас работоспособности.

Введение

В настоящее время в морских и речных портах, а также на судоремонтных заводах находят применение разнообразные по выполняемым функциям и конструктивному исполнению технологические машины. К их числу относятся различные виды кранов, конвейеры, перегружатели, вагоноопрокидыватели, роботы и манипуляторы, металлорежущие станки и т.п. Электроприводы механизмов этих машин в большинстве случаев являются многомассовыми [1]. К ним предъявляются разнообразные, достаточно жесткие, функциональные требования. Например, к электроприводам *металлорежущих станков* предъявляются повышенные требования по быстродействию и точности, а также диапазону регулирования скорости. В настоящее время наблюдается тенденция к возрастанию этих требований. Так, в соответствии с [2], электроприводы подач металлорежущих станков и промышленных роботов должны обеспечивать режимы позиционирования, заданной скорости и ускорения. При этом полоса пропускания контура скорости должна быть не менее 30 Гц для тиристорных и 100 Гц для транзисторных систем, а диапазоны регулирования от 1000 до 10000. Наличие упругих свойств механизмов металлорежущих станков приводит к возникновению резонансных колебаний с частотами 5 – 200 Гц, что ограничивает быстродействие систем, построенных по принципу подчиненного регулирования [3]. В целях управления применяются также системы на основе регуляторов состояния, синтезируемые методами модального или оптимального управления, включая адаптивную самонастройку.

Особенностью электромеханических систем (ЭМС) объектов водного транспорта и, в частности, береговых ЭМС являются сложные условия их эксплуатации. Эти системы подвержены влиянию параметрических возмущений, что связано с изменением конфигурации механизмов, характеристик материала, массы обрабатываемых деталей, температуры и влажности окружающей среды. В результате возникают флуктуации параметров объекта управления с широким диапазоном изменения моментов инерции от 1,5 до 10 кг·м², коэффициентов передачи — от 2,5 до 5, постоянных времени — от 1,5 до 5 с. Влияние возмущений связано с флуктуациями параметров обрабатываемого материала, изменением моментов нагрузки, колебаниями напряжения питающей сети, а также шумами измерительных преобразователей тока, скорости и перемещения. Эти возмущения, в отличие от параметрических, как правило, представляют собой случайные процессы с широким спектром частот, что затрудняет их компенсацию в контуре обратной связи [3].

Параметрический синтез систем управления электроприводов, как правило, сводится к задаче настройки их регуляторов. При этом достаточно часто применяются стандартные настройки на технический и симметричный оптимум [3]. Такие настройки имеют известные недостатки. При их использовании рассматриваются лишь два динамических показателя (время переходного процесса и максимальное перерегулирование), а оптимальный синтез коэффициентов усиления и постоянных времени регуляторов осуществляется лишь по одному критерию — критерию главного показателя [4]. Применение методов модального или оптимального управления позволяет синтезировать системы управления на базе регуляторов состояния для объектов высокого порядка, в том числе с перекрестными связями координат состояния. Однако эти методы могут приводить к решениям с высокой параметрической чувствительностью, малоэффективным в условиях параметрической неустойчивости объекта управления.

Следует отметить, что все более широкое применение на практике находят регуляторы с наблюдателями состояния (РНС). Их достоинством является достаточно гибкая структура регулятора и необходимость наличия лишь одного датчика выходной координаты объекта управления. Для параметрической оптимизации таких систем достаточно часто используется метод модального синтеза на основе стандартных распределений корней характеристического полинома. Однако при этом не учитываются показатели параметрической надежности и возможные ограничения координат, присущие электроприводу. В этой связи в управлении ЭМС стало развиваться направление робастного управления, т. е. сохранения работоспособности, а также основных показателей качества систем автоматического управления при вариации параметров элементов регуляторов в заданных пределах [5]. Вместе с тем такой подход не позволяет в полной мере учесть пара-

метрическую нестабильность большинства ЭМС, поэтому для электроприводов технологических машин объектов водного транспорта, работающих в сложных условиях и подверженных влиянию внешних возмущающих воздействий, требуется формирование критерия оптимальности, обеспечивающего наряду с показателями назначения заданную или максимально возможную вероятность безотказной работы. Таким образом, ставится задача формирования критерия оптимальности, обеспечивающего требуемую вероятность безотказной работы и выполнение всех требований, предъявляемых к показателям назначения систем управления электроприводов и разработки алгоритмов синтеза этих систем по выбранному критерию.

Формирование критерия оптимальности при синтезе систем управления. В работах [5], [6] отмечается, что применение методов параметрической оптимизации позволяет учесть весь комплекс требований, предъявляемых к системам автоматического управления электропривода. Трудность решения задачи оптимизации осложняется проблемой формирования критериев качества управления, большинство которых носят косвенный характер, и сходимостью алгоритмов поиска глобального экстремума выбранной целевой функции. Отмечается, что синтез систем с РНС следует осуществлять не на основе косвенных критериев оптимальности, а на основе требований к качеству управления электропривода, включая показатели назначения (быстродействия, точности, энергетической эффективности) и параметрической надежности. Находит также применение обобщенный критерий качества, включающий следующие нормированные показатели: быстродействия $\bar{Y}_1$, точности $\bar{Y}_2$, параметрической грубости $\bar{Y}_3$ и энергетических затрат на управление $\bar{Y}_4$:

$$\bar{Y}_m = 1 - \left(\prod_{i=1}^m \bar{Y}_i \right)^{1/m}, \quad (1)$$

где $m = 4$ — число показателей качества в составе критерия.

В качестве показателя быстродействия принимается время нарастания переходной характеристики t_n , в качестве показателя точности $\bar{Y}_2$ — средний модуль относительного отклонения выходной координаты системы на интервале времени от t_n до t_n :

$$\bar{\sigma}_y = \frac{1}{N - T} \sum_{j=T}^N \left| \frac{Y_j - Y_3}{Y_3} \right| \cdot 100 \%,$$

где $T = t_n / T_0$ и $N = t_n / T_0$ — соответственно относительное время нарастания переменной и относительное время переходного процесса; T_0 — период квантования.

В качестве показателя робастности $\bar{Y}_3$ в работе [5] предлагается использовать средний модуль отклонения переходной характеристики ЭМС при вариации параметров относительно расчетных значений за время переходного процесса:

$$\bar{\sigma}_R = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{Y_j - Y_j^*}{Y_j} \right| \cdot 100 \%,$$

где Y_j , Y_j^* — значения выходной координаты, соответственно, при расчетных и измененных параметрах системы управления.

Показателем энергетических затрат на управление $\bar{Y}_4$ может являться пиковое значение тока электродвигателя, которое ограничивается перегрузочной способностью силовой части системы.

Основным недостатком критерия (1) является его мультипликативная форма задания, которая является субъективной и имеет известные ограничения [4]. В качестве критерия оптимальности для решения задачи параметрического синтеза систем управления электроприводов технологических машин портов и судоремонтных заводов предлагается использовать запас работоспособности. Сущность, достоинства и особенности практического использования этого критерия подробно изложены в работах [7], [8]. При этом в работе [7] доказано, что при ограниченных статистических данных о законах распределения параметров элементов ЭМС или при их полном отсутствии запас работоспособности в полной мере характеризует вероятность безотказной работы и может быть использован в качестве критерия оптимальности при решении задач структурного и параметрического синтеза.

Управление электромагнитным моментом осуществляется при постоянном токе намагничивания. Объектом управления контура момента является преобразователь и электрическая часть электродвигателя, представленные апериодическим звеном первого порядка. Регулятор момента интегрально-пропорциональный, управление скоростью двухконтурное. Первый контур скорости содержит пропорциональный регулятор, настроенный на технический оптимум, второй — адаптивный регулятор, меняющий свою структуру в зависимости от режима работы привода. Регулятор скорости идентифицирует два режима работы электропривода: режим стабилизации электромагнитного момента и режим стабилизации скорости. В режиме стабилизации электромагнитного момента регулятор скорости — апериодическое звено первого порядка, в режиме стабилизации скорости регулятор скорости — интегральное звено. Двухконтурный регулятор скорости позволяет обеспечивать астатические характеристики электропривода и перерегулирование скорости первой массы на уровне 4,3 %.

Для решения задач параметрического синтеза методами планирования эксперимента [9] были построены факторные модели, устанавливающие связь между показателями качества системы управления и рассматриваемыми первичными параметрами: коэффициентами усиления регуляторов тока (k_{PT}) и скорости (k_{PC}), постоянной времени регулятора тока (T_{PT}) и коэффициентом жесткости упругой связи (c_{12}). Ограничения для значений этих параметров приведены в табл. 1.

В качестве показателей качества были выбраны:

Y_1 — время нарастания скорости электродвигателя до установившегося значения;

Y_2 — относительная величина перерегулирования, характеризующая степень устойчивости системы;

Y_3 — пиковое значение тока якоря электродвигателя, косвенно характеризующее энергетические затраты электропривода [5].

Условия работоспособности имеют следующий вид:

$$0 < Y_1 < 0,7 \text{ c}; 0 < Y_2 < 4,5; 0 < Y_3 < 35 \text{ A.}$$

Таблица 1

Диапазоны варьирования первичных параметров системы управления

Фактор	Нормированное обозначение	Значения уровней факторов		
		минимальное	среднее	максимальное
$k_{PC}, \text{В} \cdot \text{рад} / \text{с}$	X_1	6,66	10,66	14,66
$k_{PT}, \text{В} \cdot \text{А}$	X_2	0,074	0,144	0,214
$c_{12}, \text{Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$	X_3	100	300	500
$1/T_{PT}, 1/\text{с}$	X_4	12,713	22,713	32,713

Для проведения эксперимента был выбран дробный факторный эксперимент — ДФЭ 2^{4-1} , уравнение регрессии которого имеет вид [7]:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_1 X_2 + b_6 X_2 X_3 + b_7 X_1 X_3. \quad (2)$$

Существенными были выбраны факторы X_1, X_2, X_3 . Фактор X_4 варьировался на основе генерирующего соотношения $X_4 = X_1 X_2 X_3$. В ходе эксперимента менялись значения момента сопротивления. Был проведен также полный факторный эксперимент с тремя факторами: X_1, X_2, X_3 . Уравнение регрессии имеет вид:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{23} X_2 X_3 + b_{13} X_1 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3. \quad (3)$$

Матрица планирования приведена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования по схеме дробного факторного эксперимента ДФЭ 2^{4-1}

№ п/п.	Факторы				Отклики											
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₁ = t _{нар} , с			t _{нар}	Y ₂ = δ, %			δ̄	Y ₃ = I _{max} , А			I _{max}
					M _c =0	M _c =0,5M _н	M _c =M _н		M _c =0	M _c =0,5M _н	M _c =M _н		M _c =0	M _c =0,5 M _н	M _c =M _н	
1	+1	+1	+1	+1	0,69	0,95	1,53	1,05	2,49	1,74	1,00	1,75	36,09	36,58	37,06	36,58
2	−1	+1	+1	−1	0,74	1,04	1,76	1,18	5,56	4,16	2,39	4,04	32,61	33,57	34,68	33,62
3	+1	−1	+1	−1	0,74	1,02	1,67	1,14	2,79	1,99	1,36	2,05	32,31	33,47	34,60	33,46
4	−1	−1	+1	+1	0,69	0,96	1,59	1,08	4,58	3,99	2,30	3,62	39,47	40,05	40,44	39,99
5	+1	+1	−1	−1	0,74	1,02	1,67	1,14	3,90	2,92	1,50	2,77	33,53	34,79	36,35	34,89
6	−1	+1	−1	+1	0,69	0,96	1,55	1,07	5,61	3,82	2,69	4,04	36,95	37,74	38,51	37,73
7	+1	−1	−1	+1	0,70	0,94	1,57	1,07	2,48	1,89	1,52	1,96	37,23	37,85	38,57	37,89
8	−1	−1	−1	−1	0,74	1,03	1,69	1,15	6,90	4,46	2,90	4,75	35,50	36,79	38,04	36,78

При проведении параллельных опытов номинальный момент сопротивления принимался равным $M_n = 19,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Оценки коэффициентов уравнений регрессии определяются по формулам:

$$b_g = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_g(X_k) \bar{Y}_k; \quad g = 0, 1, \dots, i, \dots, j, \dots, N-1,$$

где k — номер опыта, $k = 1, 2, \dots, N$, а переменная g определяет базисную функцию f_g , которая соответствует фактору X_i или произведению факторов (например, $X_i X_j$).

В частности, коэффициенты регрессионных моделей для экспериментальных планов ДФЭ и ПФЭ 2^{4-1} определяются по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_{0k} \bar{Y}_k; \quad b_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_{ik} \bar{Y}_k, i = 1, 2, \dots, n;$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_{ik} X_{jk} \bar{Y}_k; \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad i \neq j;$$

$$b_{ijl} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_{ik} X_{jk} X_{lk} \bar{Y}_k, \quad i, j, l = 1, 2, \dots, n \quad i \neq j \neq l,$$

где b_0 — коэффициент, являющийся свободным членом уравнения регрессии; b_i — коэффициенты линейных членов уравнения; b_{ij} — коэффициенты при парных взаимодействиях факторов; b_{ijl} — коэффициент при тройном взаимодействии факторов.

Расчетные значения коэффициентов модели для обоих экспериментальных планов при $M_c = 0$ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты факторных моделей (2) и (3)

Коэффициент модели	Показатели качества схемы ДФЭ 2 ⁴⁻¹			Коэффициент модели	Показатели качества схемы ПФЭ		
	Y_1	Y_2	Y_3		Y_1	Y_2	Y_3
	$t_{\text{нар}}, \text{с}$	$\delta, \%$	$I_{\text{max}}, \text{А}$		$t_{\text{нар}}, \text{с}$	$\delta, \%$	$I_{\text{max}}, \text{А}$
b_0	2,2196	6,243	72,731	b_0	0,7142	4,288	35,462
b_1	-0,0159	-1,982	-1,326	b_1	0,0005	-1,374	-0,671
b_2	0	0,053	-1,322	b_2	-0,0020	0,102	-0,663
b_3	0,0058	-0,519	-0,910	b_3	-0,0020	-0,433	-0,341
b_4	-0,0435	-0,280	1,680	b_{12}	-0,0016	0,177	0,682
b_5	-0,006	0,200	1,382	b_{23}	0,0009	0,069	-0,103
b_6	0,0061	0,005	-0,303	b_{13}	-0,0004	0,160	-0,250
b_7	-0,0127	0,048	-0,459	b_{123}	-0,0243	-0,499	1,980

Эксперимент был проверен на воспроизводимость, а модели (2) и (3) — на адекватность.

Как установлено в работе [7], для параметрического синтеза ЭМС по критерию запаса работоспособности необходимо построить область работоспособности исследуемой системы. При этом, в случае наличия аналитической модели, связывающей между собой в явном виде показатели качества системы и ее оптимизируемые параметры, наиболее эффективным является метод параллельных прямых [10]. Следуя рекомендациям работы [7], методом параллельных прямых [10], [11] были определены граничные точки областей работоспособности для обоих экспериментов и получены модели, аналитически описывающие эти области. Например, для случая трех факторов модель, записанная в виде рекуррентного уравнения на основании [10], имеет вид:

$$\mathbf{M}: \varphi_1 = Y_1 \geq 0; \varphi_2 = 0,7 - Y_1 \geq 0; \varphi_3 = Y_2 \geq 0; \varphi_4 = 4,5 - Y_1 \geq 0; \varphi_5 = Y_3 \geq 0; \varphi_6 = 35 - Y_1 \geq 0.$$

$$\mathbf{P}: \varphi_7 = X_1 + 1 \geq 0; \varphi_8 = 1 - X_1 \geq 0; \varphi_9 = X_2 + 1 \geq 0; \varphi_{10} = 1 - X_2 \geq 0; \varphi_{11} = X_3 + 1 \geq 0; \varphi_{12} = 1 - X_3 \geq 0.$$

$$\varphi_{12} = 0,5(\varphi_1 + \varphi_2 - |\varphi_1 - \varphi_2|); \varphi_{34} = 0,5(\varphi_3 + \varphi_4 - |\varphi_3 - \varphi_4|); \varphi_{56} = 0,5(\varphi_5 + \varphi_6 - |\varphi_5 - \varphi_6|);$$

$$M = M(X) = 0,5(\varphi_{12} + \varphi_{34} - |\varphi_{12} - \varphi_{34}|); \varphi_{56} = 0,5(\varphi_{14} + \varphi_{56} - |\varphi_{14} - \varphi_{56}|);$$

$$\varphi_{78} = 0,5(\varphi_7 + \varphi_8 - |\varphi_7 - \varphi_8|); \varphi_{9,10} = 0,5(\varphi_9 + \varphi_{10} - |\varphi_9 - \varphi_{10}|); \varphi_{11,12} = 0,5(\varphi_{11} + \varphi_{12} - |\varphi_{11} - \varphi_{12}|);$$

$$\varphi_{7,10} = 0,5(\varphi_{78} + \varphi_{9,10} - |\varphi_{78} - \varphi_{9,10}|); P = P(X) = 0,5(\varphi_{7,10} + \varphi_{11,12} - |\varphi_{7,10} - \varphi_{11,12}|);$$

$$G = G(X) = 0,5(P + M) - |P - M|.$$

В приведенных уравнениях область $\mathbf{M}$ является отображением допусковой области $\mathbf{D}$ пространства выходных параметров системы управления в пространство ее оптимизируемых внутренних параметров. При этом область $\mathbf{D}$ имеет вид гиперпараллелепипеда и геометрически задает требуемые ограничения на значения выходных параметров системы. Область $\mathbf{P}$ задает огра-

ничения на внутренние параметры системы. Функция $G(X)$ является аналитическим описанием области работоспособности G системы управления.

Для выбора оптимальных по критерию запаса работоспособности исследуемых параметров использовались рассмотренные в работе [7] алгоритмы, предполагающие выполнение процедуры статистического моделирования. На рис. 2 приведены результаты моделирования в виде представления допускowej области M массивом экспериментальных точек в разных ракурсах. Допусковая область P имеет вид прямоугольника.

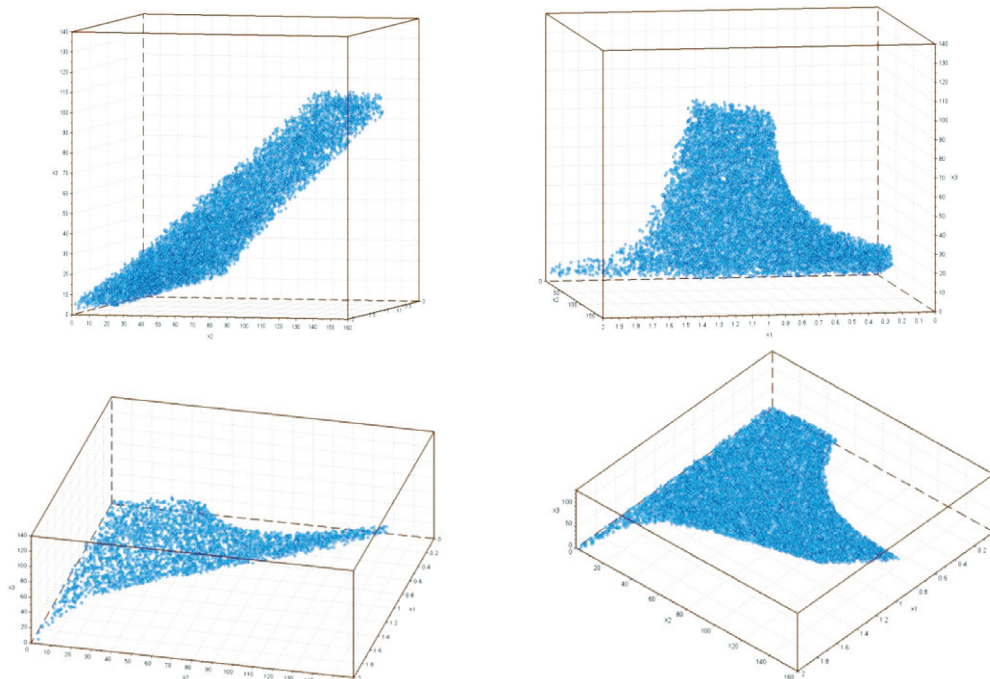


Рис. 2. Представление допускowej области M массивом сгенерированных точек в разных ракурсах

На рис. 3а в виде массива экспериментальных точек представлена область работоспособности при увеличенных на 10 % ограничениях на значения показателей качества, на рис. 3б — область, в которой находится оптимальное решение. Полученные в ходе оптимизации значения параметров $k_{PC} = 11,8$; $k_{PT} = 0,12$; $c_{12} = 270$ гарантируют выполнение всех ограничений на динамические показатели системы управления и обеспечивают максимально возможный в рамках данной структуры запас работоспособности.

а)

б)

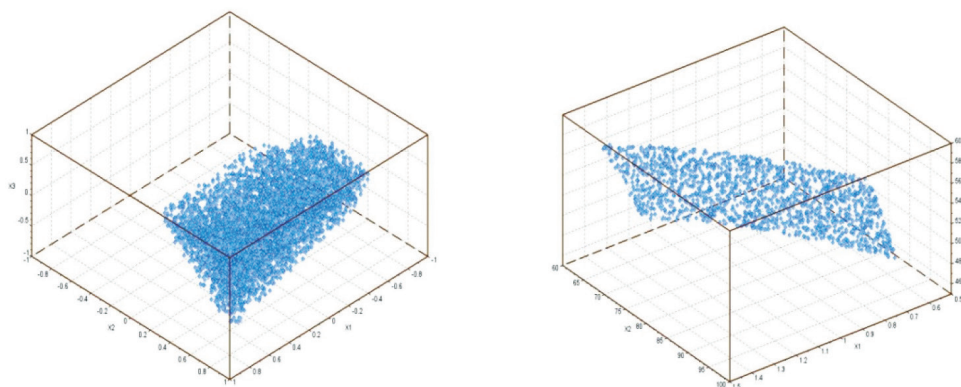


Рис. 3. Представление области работоспособности массивом сгенерированных точек:

а — при расширении допустимых пределов изменения выходных параметров;

б — при заданных пределах изменения выходных параметров

Анализ показал, что механическая часть электропривода оказывает существенное влияние на динамику системы управления. Это лишний раз подтверждает необходимость применения выведенных в работе [12] формул получения параметров эквивалентной расчетной схемы механической подсистемы, которые по сравнению с известными формулами позволяют существенно повысить точность расчета искомых параметров.

Поскольку все более широкое применение для построения систем управления электропривода находят структуры с регуляторами состояния, рассмотрим процесс параметрического синтеза для двухмассовой ЭМС постоянного тока, представленной на рис. 4 [5]. В схеме замкнутый контур тока представлен апериодическим звеном первого порядка с параметрами K_I и T_I . Исходные данные параметров системы [5]:

$$K_I = 1; T_I = 0,007; C = 0,16; J_1 = 0,015; J_2 = 0,05; c_{12} = 0,65; K_d = 0,01.$$

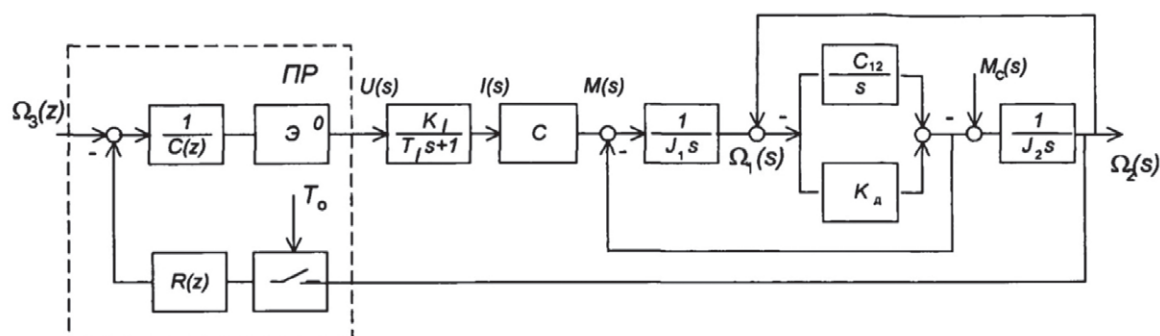


Рис. 4. Структурная схема системы управления электропривода постоянного тока с регулятором состояния

В качестве выходной координаты электропривода при расчете динамических показателей принималась скорость второй массы. Показателями качества являлись рассмотренные выше показатели быстродействия $Y_1 = t_n$, точности $Y_2 = \sigma_y$, робастности $Y_3 = \sigma_R$, энергетических затрат $Y_4 = I_{я}$. Оптимизируемыми параметрами являются параметры параметрического регулятора, передаточная функция которого в числителе имеет вид полинома $R(S) = b_0 + b_1S + b_2S^2$, а в знаменателе равна единице. Полученные в работе [5] оптимальные по комплексному критерию (1) параметры параметрического регулятора имеют следующие значения: $b_0 = 7,1$; $b_1 = 1,35$; $b_2 = 0,21$. Графики переходных процессов приведены на рис. 5, где график 1 соответствует расчетным по критерию (1) параметрам системы управления, а графики 2 и 3 — вариациям параметров J_2 и c_{12} механической части электропривода.

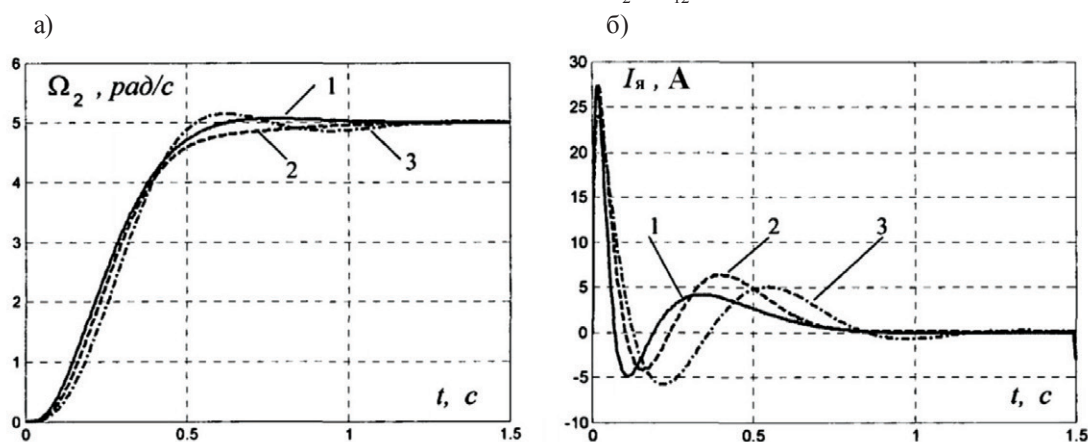


Рис. 5. Графики переходных процессов при оптимизации параметров параметрического регулятора состояния по комплексному критерию:

- а — график угловой скорости второй массы электропривода;
б — график изменения тока якоря электропривода

Как отмечалось ранее, применение критериев вида (1), относящихся к мультипликативно-му способу задания обобщенного критерия качества, может привести к существенным ошибкам. Учитывая необходимость обеспечения максимально возможного запаса работоспособности, было осуществлено моделирование данной системы управления на языке комплекса Matlab 7.1 и составлена модель ЭМС в программной среде Simulink. Эксперимент проводился по схеме ПФЭ, матрица которого имеет вид аналогичный табл. 3. Исследуемые параметры варьировались в следующем диапазоне: $b_0 \in [2; 10]$, $b_1 \in [0,6; 1,6]$, $b_2 \in [0,1; 0,26]$. Графики переходных процессов для тока якоря и угловой скорости второй массы, соответствующие всем строкам матрицы планирования, представлены на рис. 6.

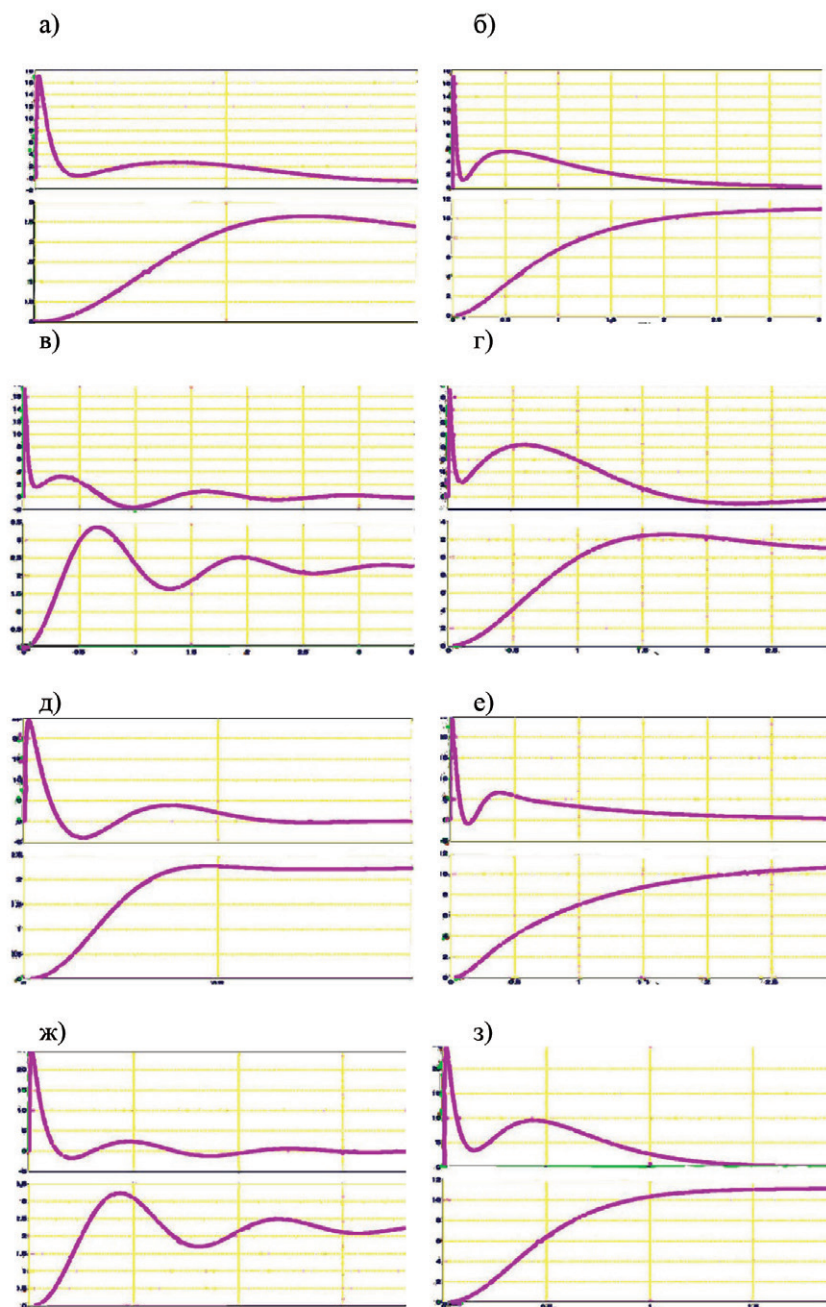


Рис. 6. Переходные процессы тока якоря (верхние графики) и угловой скорости (нижние графики) второй массы при моделировании ЭМС по схеме ПФЭ (на основе анализа табл. 2): а — первая строка таблицы; б — вторая строка; в — третья строка; г — четвертая строка; д — пятая строка; е — шестая строка; ж — седьмая строка; з — восьмая строка

Аналогичные исследования проводились при одновременной вариации четырех параметров, включая жесткость упругой связи. Результаты оптимизации по критерию запаса работоспособности оказались близкими к значениям параметров, полученным в работе [5], но с чуть большим (на 7 %) значением времени переходного процесса и с большим на 15 % запасом работоспособности ЭМС. При этом обеспечивается выполнение всех требований, предъявляемых к показателям назначения электропривода и его максимально возможный запас работоспособности.

Выводы

1. Для параметрического синтеза систем управления электроприводов объектов водного транспорта, включая электроприводы технологических машин портов и судоремонтных заводов, в качестве критерия оптимизации целесообразно использовать запас работоспособности системы. Этот показатель гарантирует выполнение всех требований, предъявляемых к показателям назначения электропривода, сводит задачу векторной оптимизации к задаче скалярной оптимизации и обеспечивает высокую вероятность безотказной работы.

2. Для обеспечения максимально возможного запаса работоспособности систем управления электроприводов следует использовать специально разработанные методы и алгоритмы, изложенные в работах [10], [11]. При этом гарантируется получение глобального оптимума и отсутствие заклинивания в процессе поиска. Кроме того, снимаются ограничения на размерность пространства оптимизируемых параметров электропривода.

3. Рассмотренные примеры иллюстрируют последовательность решения задачи параметрического синтеза по критерию запаса работоспособности для систем управления электроприводов, которые в настоящее время находят самое широкое применение. Примеры подтверждают удобство практического использования запаса работоспособности в качестве критерия оптимизации и вывод о том, что полученное решение является глобальным оптимумом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов Е. Н. Моделирование механических систем морской перегрузочной техники методом электрической аналогии / Е. Н. Андрианов, А. В. Саушев, Д. И. Троян // Морской вестник. — 2015. — № 1 (53). — С. 49–52.
2. ГОСТ 27803-91. Электроприводы регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Технические требования. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 21 с.
3. Самосейко В. Ф. Теоретические основы управления электроприводом / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.
4. Батищев А. П. Поисковые методы оптимального проектирования / А. П. Батищев. — М.: Сов. радио, 1975. — 215 с.
5. Анисимов А. А. Формирования критерия оптимальности в задачах синтеза регуляторов состояния электромеханических систем / А. А. Анисимов, С. В. Тарарыкин // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2009. — № 10. — С. 36–41.
6. Тарарыкин С. В. Робастное модальное управление динамическими системами / С. В. Тарарыкин, В. В. Тютиков // Автоматика и телемеханика. — 2002. — № 5. — С. 41–55.
7. Саушев А. В. Параметрический синтез электротехнических устройств и систем / А. В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 315 с.
8. Абрамов О. В. Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. — 2014. — № 4 (42). — С. 64–77.
9. Саушев А. В. Планирование эксперимента в электротехнике: учеб. пособие / А. В. Саушев. — СПб.: СПГУВК, 2012. — 273 с.
10. Саушев А. В. Области работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев. — СПб.: Политехника, 2013. — 412 с.
11. Саушев А. В. Методы и алгоритмы параметрического синтеза технических систем на основе областей работоспособности / А. В. Саушев // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 5-3 (47). — С. 167–168. DOI: 10.18454/IRJ.2016.47.090.
12. Саушев А. В. Математическое описание многомассовых механических систем электропривода / А. В. Саушев // Электричество. — 2013. — № 3. — С. 27–33.

PARAMETRICAL SYNTHESIS OF MANAGEMENT SYSTEMS OF ELECTRIC DRIVES TECHNOLOGICAL MACHINES OF PORTS AND REPAIR YARDS

The task of parametrical synthesis of management systems of electric drives in relation to technological machines of coastal installations is considered. The analysis of the known methods of the solution of this task is provided. Indicators of quality of management systems and methods of creation of optimality criterion are analyzed. The standard block diagram of the electric drive of technological machines of coastal installations is researched and the problem of parametrical synthesis by criterion of an inventory of working capacity is solved. An example of parametrical synthesis of management systems of the electric drive with condition regulators which find more and more wide practical applications is reviewed. The optimum result by the chosen criterion is compared to the decision received when using of the generalized multiplicative optimality criterion. The conclusion about feasibility of application as optimality criterion is drawn, in case of the solution of a task of parametrical synthesis of management systems of electric drives, a working capacity inventory. The decision received by this criterion guarantees accomplishment of all requirements imposed to the electric drive and provides its high parametrical reliability.

Keywords: electric drive, management system, area of working capacity, parametrical synthesis, working capacity inventory.

REFERENCES

1. Andrianov, E. N., A. V. Saushev, and D. I. Troyan. "Modeling of the mechanical systems of the marine cargo handling equipment by means of the electrical analogy method." *Morskoy Vestnik* 1(53) (2015): 49–52.
2. Russian Federation. GOST 27803-91 Jelektroprivody reguliruemye dlja metalloobrabatyvajushhego oborudovanija i promyshlennyh robotov. Tehnicheskie trebovanija. M.: Izd-vo standartov, 1991.
3. Samosejko, V. F. *Teoreticheskie osnovy upravlenija jelektroprivodom*. SPb.: Jelmor, 2007.
4. Batishchev, A. P. *Poiskovyje metody optimalnogo proektirovanija*. M.: Sov. radio, 1975.
5. Anissimov, A. A., and S. V. Tararykin. "The Forming of Optimization Criterion in the Problems of Parametric Synthesis of the State Regulators in Electromechanical Systems." *Mechatronics, automation, control* 10 (2009): 36–41.
6. Tararykin, S. V., and V. V. Tyutikov. "A robust model control for dynamic systems." *Automation and Remote Control* 63.5 (2002): 730–742.
7. Saushev, A. V. *Parametricheskij sintez jelektrotehnicheskikh ustrojstv i sistem*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
8. Abramov, O. V. "Possibilities and prospects of the functional-parametrical approach of reliability theory." *Information Science and Control Systems* 4(42) (2014): 64–77.
9. Saushev, A. V. *Planirovanie jeksperimenta v jelektrotehnike: Uchebnoe posobie*. SPb.: SPGUVK, 2012.
10. Saushev, A. V. *Oblasti rabotosposobnosti jelektrotehnicheskikh sistem*. SPb.: Politehnika, 2013.
11. Saushev, A. V. "Methods and algorithms of parametrical synthesis of technical systems on the basis of areas of working capacity." *International research journal* 5-3(47) (2016): 167–168. DOI: 10.18454/IRJ.2016.47.090.
12. Saushev, A. V. Mathematical description of multimass mechanical systems of the electric drive / A. V. Saushev // *Electrical Technology Russia* 3 (2013): 27–33.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саушев Александр Васильевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
saushev@bk.ru, ep-gumrf@bk.ru
Бова Елена Владимировна — доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saushev Aleksandr Vasil'evich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
saushev@bk.ru, ep-gumrf@bk.ru
Bova Elena Vladimirovna — associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.