

УДК 681.5.015.8

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВУХФАЗНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ, РАБОТАЮЩЕГО В ЗАДАННОМ ДИАПАЗОНЕ ЗНАЧЕНИЙ ВЫХОДНЫХ КООРДИНАТ

IDENTIFICATION OF TWO-PHASE INDUCTION MOTOR DRIVE WITHIN THE SPECIFIED RANGE OF OUTPUT COORDINATES VALUES

А. Г. Стрижнев,
нач. сектора СКБ-4 НПООО «ОКБ ТСП», канд. техн. наук, доцент

А. А. Шихов,
инженер-конструктор I кат. СКБ-4 НПООО «ОКБ ТСП»

А. Н. Русакович,
инженер-конструктор СКБ-4 НПООО «ОКБ ТСП», аспирант каф. СУ БГУИР

A. Strizhnev, A. Shykhau, A. Rusakovich

Дата поступления в редакцию — 07.07.2015 г.

В статье приведены результаты идентификации нелинейного объекта управления (ОУ), работающего в заданном диапазоне значений выходных координат. Данное исследование проводилось для сравнения авторского и классических методов идентификации параметров ОУ. В качестве ОУ выбран электропривод (ЭП) с двухфазным асинхронным двигателем, который может работать в широком и узком диапазоне значений выходных координат. Осуществлено снятие, построение, нормирование и аппроксимация различных регулировочных характеристик (РХ) исследуемого ЭП. Используя полученные данные, проведено снятие различными методами (классическим и авторским) логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик (ЛАФЧ). Построены результирующие ЛАФЧ, выполнена структурная и параметрическая идентификация ЭП. Используя результаты идентификации и нормированные РХ, воспроизведены полная РХ и переменный коэффициент передачи ЭП. Получена модель ЭП и проведена проверка ее работы, которая показала высокую точность воспроизведения параметров реального ЭП, работающего как в широком, так и узком диапазонах значений выходных координат. Результаты исследований подтверждают высокую эффективность авторского метода, что позволяет сделать вывод о необходимости его применения для идентификации других нелинейных ОУ.

This article presents findings of identification for nonlinear plant operating within the specified range of output coordinates values. The investigation has been conducted for comparison of novel author's approach and classical approach to identification plant's parameters. Two-phase induction motor drive within wide and short ranges of coordinates values has been used as the plant. Various regulating characteristics have been obtained for the plant and then they have been plotted, normalized and approximated. Bode plots have been obtained using different methods of measurement and result decibel-log frequency responses based on these plots also have been plotted. With reference to obtained frequency characteristics structural and parametric system identification has been realized. Further to above, variable gain and full regulation characteristic of the plant have been recovered. Mathematical simulation has been done to verify high coincidence of model and real drive within both wide and short ranges of coordinates values. The findings of the investigation confirm high efficiency of the novel author's method and allow applying it for different nonlinear plants identification.

Большинство технических объектов управления (ОУ) являются нелинейными и работают в заданном (иногда очень узком) диапазоне значений выходных координат. Вследствие этого идентифицировать такие ОУ традиционными методами очень сложно, а иногда и невозможно. Для решения данной проблемы ранее был разработан авторский метод [1] исследования нелинейных ОУ, эффективность которого требуется оценить. Для оценки метода в качестве исследуемого ОУ выбран электропривод с двухфазным асинхронным двигателем, работающий в широком (круговом) диапазоне значений выходных координат. Это позволяет использовать не только традиционный метод идентификации, а также, искусственно ограничив диапазон значений выходных координат, применить авторский метод для идентификации ОУ. Следовательно, имеется возможность не только провести идентификацию выбранного ОУ различными методами (традиционным и авторским), но и провести их сравнительную и качественную оценку, что и будет осуществлено.

1. Структурная схема электропривода.

Структурная схема исследуемого электропривода ЭП приведена на рис. 1. ЭП содержит задающее устройство ЗУ, контролирующее устройство КУ, цифровое усилительно-преобразовательное устройство ЦУПУ, выполненное на основе силового драйвера IRAMS10UP60B, двухфазный асинхронный двигатель ДАД типа ДГ-2ТА (обмотки двигателя запитаны напряжениями в виде однократной ШИМ-последовательности импульсов), исполнительный механизм ИМ, нагрузку Н и цифровой преобразователь угла ЦПУ типа OCD-C5B1B-0016-S06S-CRW. В качестве устройств ЗУ и КУ использован персональный компьютер ПК со специальным программным обеспечением СПО.

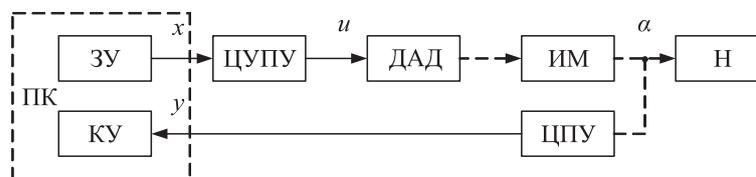


Рис. 1. Структурная схема электропривода

ЦУПУ представляет собой цифро-аналоговый преобразователь ЦАП с коэффициентом преобразования $K_{ЦАП} = u / x = 28В / 225 \text{ дел} = 0,11В / \text{дел}$, а преобразователь ЦПУ представляет собой аналого-цифровой преобразователь АЦП с коэффициентом преобразования $K_{АЦП} = y / \alpha = 65536 \text{ дел} / 360^\circ \approx 182,04 \text{ дел} / ^\circ$.

ЭП (рис. 1) может работать в диапазоне углов поворота $\alpha = \pm 180^\circ$, что соответствует изменению выходного цифрового сигнала y , снимаемого с ЦПУ, в пределах $\pm 32\,768$ дел. Величину входного цифрового сигнала x можно изменять в диапазоне ± 255 дел, что соответствует диапазону напряжений $u = \pm 28$ В, питающих ДАД.

2. Снятие и построение регулировочной характеристики.

Для снятия регулировочной характеристики (РХ) использовано СПО, разработанное в среде C++ Builder 6 [2, 3]. На вход ОУ подавались ступенчатые сигналы x_i равномерно изменяемой амплитуды 15–255 дел с шагом изменения 10 дел. Для лучшей обработки данных, количество повторений в течение цикла сканирования $T_{ЦС}$ было выбрано равным 10. При снятии РХ традиционным методом, исходя из условия получения установившихся $\dot{y}_{уст}$ значений выходной скорости (дел/с), была выбрана точка $|D|$ реверсирования $\pm 50^\circ$, которая в процессе экспериментов не изменялась. Для построения РХ авторским методом рабочий диапазон значений выходных координат был искусственно ограничен, и для получения максимальных \dot{y}_{max} значений выходной скорости (дел/с) выбрана точка $|D|$ реверсирования $\pm 5^\circ$, которая также в процессе экспериментов не изменялась.

Примеры выходных сигналов \dot{y}_i при входном сигнале с амплитудой $x_i = \pm 125$ дел, пе-

Экспериментально снятые данные установившейся и максимальной скорости

x^+ , дел	7	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125
$\dot{y}_{уст}^+$, дел /с	635	1807	3051	4223	5085	5845	6483	7072	7540	7842	8248	8451	8771
\dot{y}_{max}^+ , дел /с	369	1052	1613	2104	2567	2877	3210	3484	3789	4049	4225	4479	4549
x^+ , дел	135	145	155	165	175	185	195	205	215	225	235	245	255
$\dot{y}_{уст}^+$, дел /с	8949	9200	9281	9406	9492	9598	9569	9619	9645	9606	9664	9684	9705
\dot{y}_{max}^+ , дел /с	4729	4944	5158	5349	5352	5436	5238	5452	5409	5474	5582	5551	5595
x^- , дел	-7	-15	-25	-35	-45	-55	-65	-75	-85	-95	-105	-115	-125
$\dot{y}_{уст}^-$, дел /с	-359	-1605	-2820	-3910	-4814	-5711	-6421	-6968	-7548	-7907	-8175	-8474	-8820
\dot{y}_{max}^- , дел /с	-432	-1229	-1609	-2128	-2584	-3026	-3343	-3678	-3997	-4174	-4424	-4552	-4575
x^- , дел	-135	-145	-155	-165	-175	-185	-195	-205	-215	-225	-235	-245	-255
$\dot{y}_{уст}^-$, дел /с	-9020	-9125	-9374	-9487	-9506	-9676	-9654	-9682	-9691	-9657	-9706	-9684	-9769
\dot{y}_{max}^- , дел /с	-4849	-5062	-5247	-5370	-5273	-5633	-5468	-5522	-5477	-5656	-5631	-5744	-5657

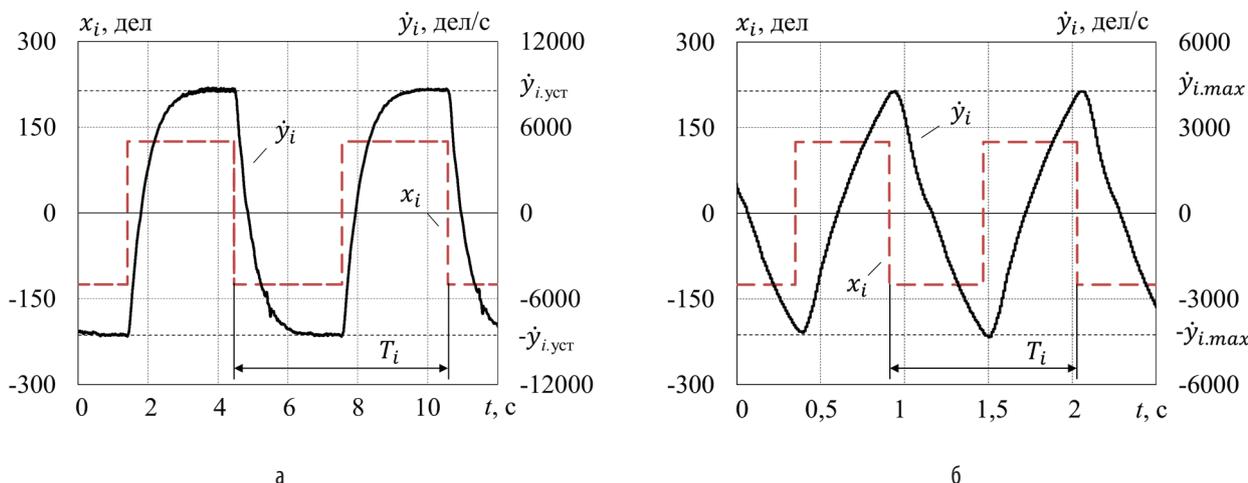


Рис. 2. Входные и выходные сигналы при определении: а — $\dot{y}_{уст}$; б — \dot{y}_{max}

риодом $T_i = 6,18$ с — для определения $\dot{y}_{уст}$, и $T_i = 1,18$ с — для определения \dot{y}_{max} приведены на рис. 2.

Экспериментально снятые данные установившейся $\dot{y}_{уст}$ и максимальной \dot{y}_{max} скоростей для различных амплитуд входных сигналов x_i представлены в табл. 1.

Используя данные табл. 1, построены различные РХ, которые приведены на рис. 3. Здесь начальная амплитуда входного сигнала $x_i = \pm 7$ дел отражает наличие в ЭП нелинейности типа «зона нечувствительности».

Для различных РХ (см. рис. 3) проведена оценка несимметричности ветвей РХ с использованием данных табл. 1 и выражения приве-

денной погрешности $N = [(y_э - y_и) / y_{max.э}] \cdot 100$ %, где $y_э = \dot{y}_{уст}^+$ ($y_э = \dot{y}_{max}^+$) — эталонное значение РХ; $y_и = \dot{y}_{уст}^-$ ($y_и = \dot{y}_{max}^-$) — измеренное значение РХ; $y_{max.э} = \dot{y}_{уст.РХ}^+ = 9705$ дел/с, ($y_{max.э} = \dot{y}_{max.РХ}^+ = 5595$ дел/с) — максимальное эталонное значение РХ. Знак «+» указывает на положительную ветвь РХ, а знак «-» — на отрицательную. Применительно к вращательному движению принято считать, что положительная ветвь РХ образуется при вращении ОУ по часовой стрелке, а отрицательная — при вращении ОУ против часовой стрелки.

Для РХ установившейся скорости максимальное значение приведенной погрешности N_{max} не превышает 3,24 %, а среднеквадратич-

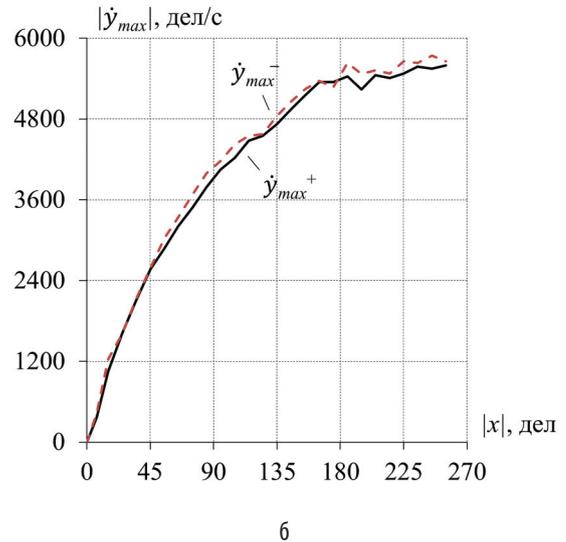
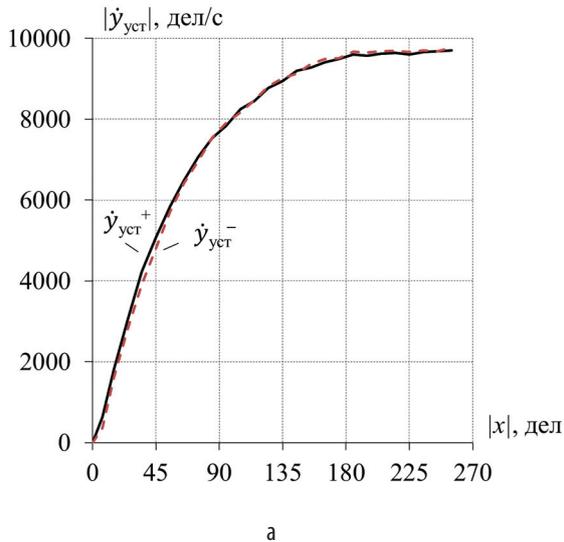


Рис. 3. Регулировочные характеристики: 1 — установившейся скорости; 2 — максимальной скорости

ное $N_{СКВ}$ отклонение составило 1,34 %. Для РХ максимальной скорости значение N_{max} не превышает 4,11 %, а $N_{СКВ}$ составило 2,32 %. При вычислении среднеквадратичных отклонений

использовано выражение $N_{СКВ} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i^2}$, где N_i — текущие значения несимметричности; $i = 1-26$ — номер отсчета; $n = 26$ — объем выборки.

Полученные значения несимметричности не превышают 5 % и в рамках проводимых исследований являются несущественными. Исходя из этого, в дальнейшем все расчёты будут проводиться только для положительных ветвей РХ.

3. Нормирование, интерполяция и линеаризация регулировочной характеристики.

Осуществлено нормирование положительных ветвей (рис.3) различных РХ с использованием данных табл. 1 и выражения $\dot{y}_{норм} = \dot{y} / \dot{y}_{max.э}$, где \dot{y} — текущее значение РХ. Нормированные РХ представлены на рис. 4.

Нормированные РХ (см. рис. 4) близко совпадают, максимальные отклонения N_{max} не превышают 10,6 %, а среднеквадратичные отклонения $N_{СКВ}$ не более 5,93 %, что в ряде случаев является допустимым. При этом начальный участок характеристик, на котором отклонение не превышает 5 %, составляет 35 дел.

С помощью расширения *Curve Fitting Toolbox* пакета программ MATLAB [4, 5] осуществлена ап-

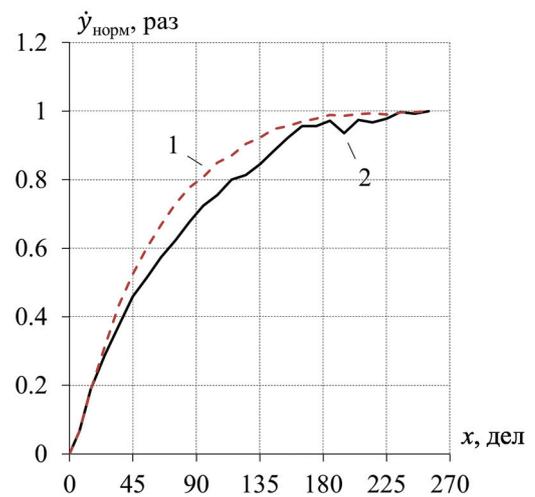


Рис. 4. Нормированные регулировочные характеристики: 1 — установившейся скорости; 2 — максимальной скорости

проксимация нормированной РХ максимальной скорости, полиномами $y_{an} = c_0x^0 + c_1x^1 + c_2x^2 + \dots + c_nx^n$ различной степени. Параметры полиномов, максимальные и среднеквадратичные отклонения приведены в табл. 2, а результаты нормирования и аппроксимации представлены на рис. 5, а. При вычислении отклонений использовано выражение $p = [(y_u - y_a) / y_{u,max}] \cdot 100\%$, где $y_u = \dot{y}_{норм}$ — текущее значение нормированной РХ максимальной скорости; y_a — текущее значение аппроксимирующего полинома; $y_{u,max} = 1$ — мак-

Таблица 2

Результаты полиномиальной аппроксимации нормированной РХ

Параметры	c_0	c_1	c_2	c_3	p_{max}	$p_{скв}$
Полином, $n = 1$ ($\dot{y}_{ап.1}$)	0,2364	0,00374	–	–	23,64 %	11,70 %
Полином, $n = 2$ ($\dot{y}_{ап.2}$)	0,04121	0,009123	–0,00002184	–	5,37 %	2,94 %
Полином, $n = 3$ ($\dot{y}_{ап.3}$)	–0,003382	0,01178	–0,00004949	0,00000007382	3,19 %	1,70 %

Таблица 3

Результаты кусочно-линейной аппроксимации

Координаты линейных участков (x , дел, $\dot{y}_{акл}$, раз)	p_{max}	$p_{скв}$
(0, 0); (35, 0,3761); (85, 0,6772); (155, 0,9219); (255;1)	2,68 %	1,43 %

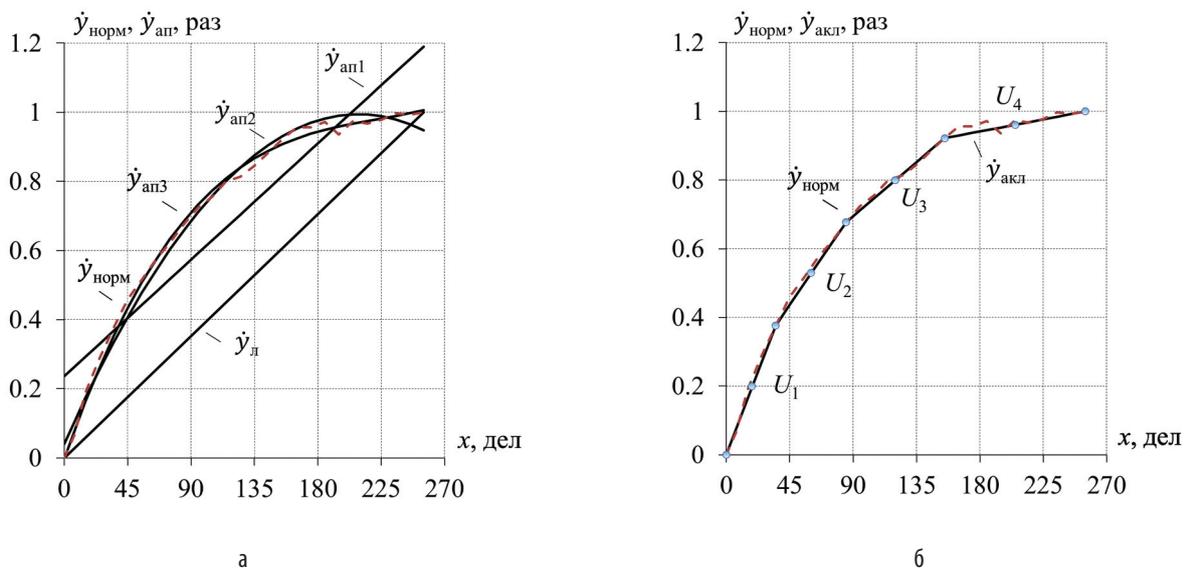


Рис. 5. Аппроксимация нормированной РХ: а — полиномиальная; б — кусочно-линейная

симальное значение нормированной РХ. Среднеквадратичные отклонения $p_{скв}$ вычислялись по выражению, аналогичному $N_{СКВ}$.

Аппроксимация полиномом 1-й степени не может использоваться (см. рис. 5, а), поскольку имеет ненулевое значение при нулевом входном сигнале. В случае необходимости, выражение 1-й степени $\dot{y}_л$, аппроксимирующее РХ, можно получить, соединив начальную и конечную точки РХ как на рис. 5, а.

Используя выражение:

$$y_{акл} = \frac{1}{2} \left[y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0) + y_{n-1} + \frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} (x - x_{n-1}) \right] + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} - \frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \right) |x - x_k|$$

осуществлена кусочно-линейная аппроксимация нормированной РХ четырьмя участками (рис. 5, б), определены координаты линейных участков, максимальное p_{max} и среднеквадратичное $p_{скв}$ приведенные отклонения (табл. 3).

Получено выражение $\dot{y}_{акл}$ для кусочно-линейной аппроксимации РХ:

$$\dot{y}_{акл} = 10^{-3}(400,423 + 5,763x - 2,362|x - 35| - 1,263|x - 85| - 1,357|x - 155|).$$

Линеаризация $\dot{y}_{акл}$ четырьмя участками с высокой точностью (p_{max} не превышает 2,68 %, $p_{скв}$ — 1,43 %) аппроксимирует нормированную РХ (см. рис. 5, б). При линеаризации с меньшим количеством участков точность значительно ниже. Кусочно-линейная аппроксимация четырьмя участками по сравнению с полиномом третьей степени обладает более высокой точностью и, в дальнейшем, будет использоваться при моделировании. Следует отметить, что в других случаях полиномиальное представление может оказаться более точным, и может быть использовано при моделировании.

Определены амплитуды входных тестовых сигналов ($U_1 = 15$ дел, $U_2 = 65$ дел, $U_3 = 125$ дел и $U_4 = 205$ дел), близкие к средним значениям линейных участков (рис. 5, б). С учетом рекомендаций [6, 7] по использованию максимально возможной амплитуды входных тестовых сигналов и сохранению линейных свойств ЭП, для снятия ЛАФЧХ лучше всего использовать амплитуду $U_3 = 125$ дел. Амплитуду $U_4 = 205$ дел не следует использовать, так как она находится на участке РХ с малым наклоном, схожим по форме с нелинейностью типа «зона насыщения». Для проверки данного предположения при снятии ЛАФЧХ будут использованы все ($U_1...U_4$) амплитуды входных тестовых сигналов.

4. Снятие и построение ЛАФЧХ.

При снятии ЛАФЧХ различными методами исследуемый ОУ перемещался в широком диапазоне значений выходных координат $\pm 180^\circ$, с применением ранее определенных амплитуд U_i входных тестовых сигналов. Во время снятия ЛАФЧХ классическим методом [8] на вход ЭП подавали синусоидальные тестовые сигналы $x_i = U_i \sin \omega t$, а при авторском методе (с программным изменением координат точки D_i реверсирования), формировались входные сигналы в виде меандра $x_i = U_i \text{sign}(\sin \omega t)$. В процессе снятия ЛАФЧХ (K_1, φ_1) классическим методом диапазон рабочих частот составил от 1 до 60 рад/с. При снятии ЛАФЧХ (K_2, φ_2) авторским методом диапазон рабочих частот составил от 0,19–0,74 рад/с до 7,11–12,78 рад/с. Минимальные рабочие частоты получены при координате D_i реверсирования $\pm 16\ 384$ дел, а максимальные рабочие частоты получены при координате D_i равной ± 1 дел.

Примеры выходных сигналов y_i при входном сигнале с амплитудой $U_3 = 125$ дел, периодом $T_i = 6,28$ с — при классическом методе и $T_i = 5,74$ с — при авторском методе приведены на рис. 6.

Формирование входных сигналов, определение параметров первых гармоник входного и выходного сигналов, а также построение ЛАФЧХ осуществлялось с помощью СПО, разработанного в среде MATLAB [4, 5]. Примеры частотных характеристик (K_1, φ_1) и (K_2, φ_2) для входного сигнала амплитудой $U_3 = 125$ дел приведены на рис. 7.

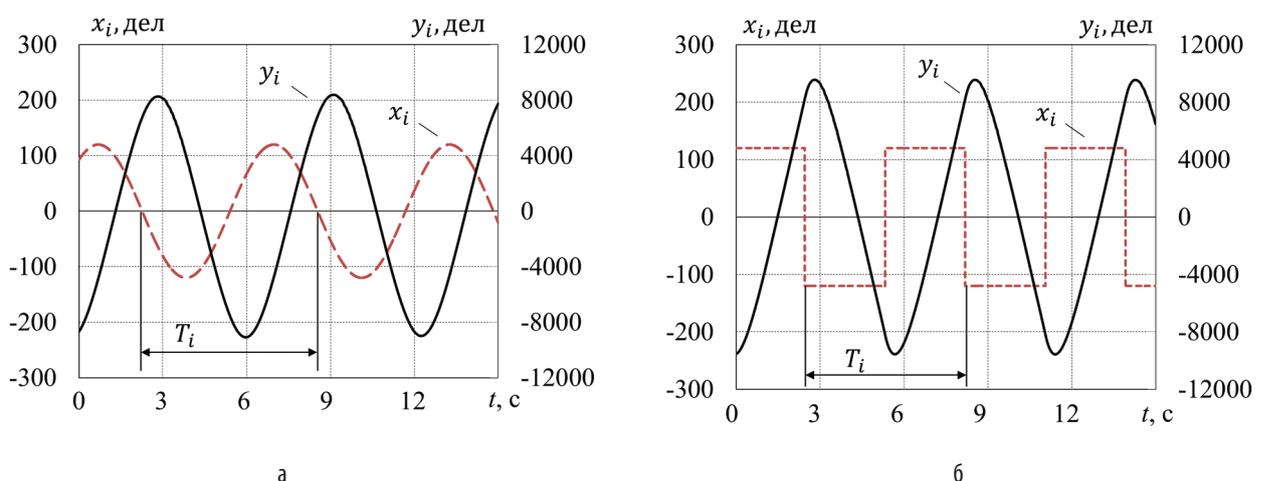


Рис. 6. Входные и выходные сигналы при снятии ЛАФЧХ различными методами: а — классическим; б — авторским

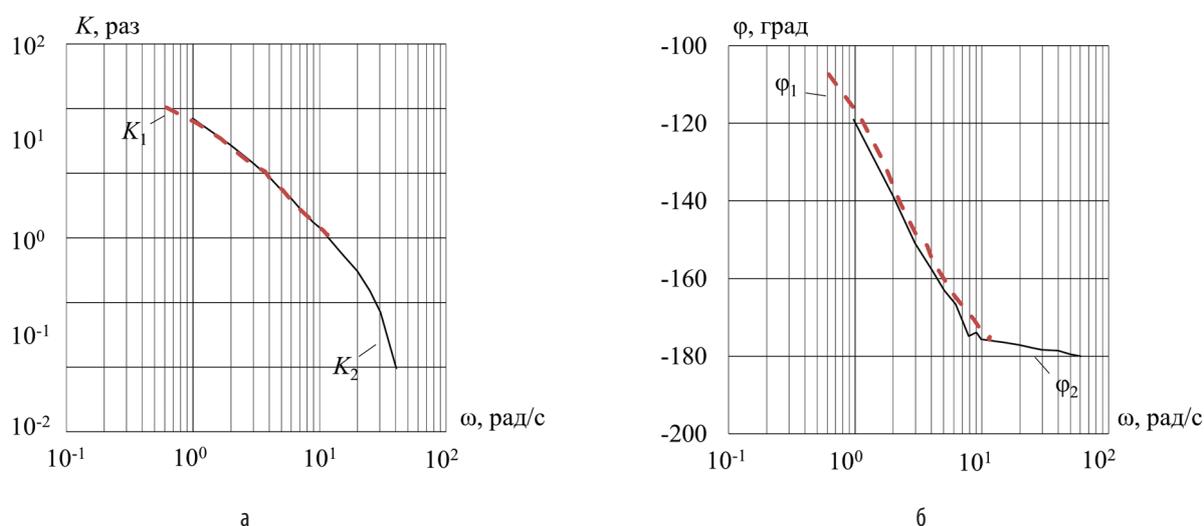


Рис. 7. Характеристики, полученные различными методами: а — ЛАЧХ; б — ЛФЧХ

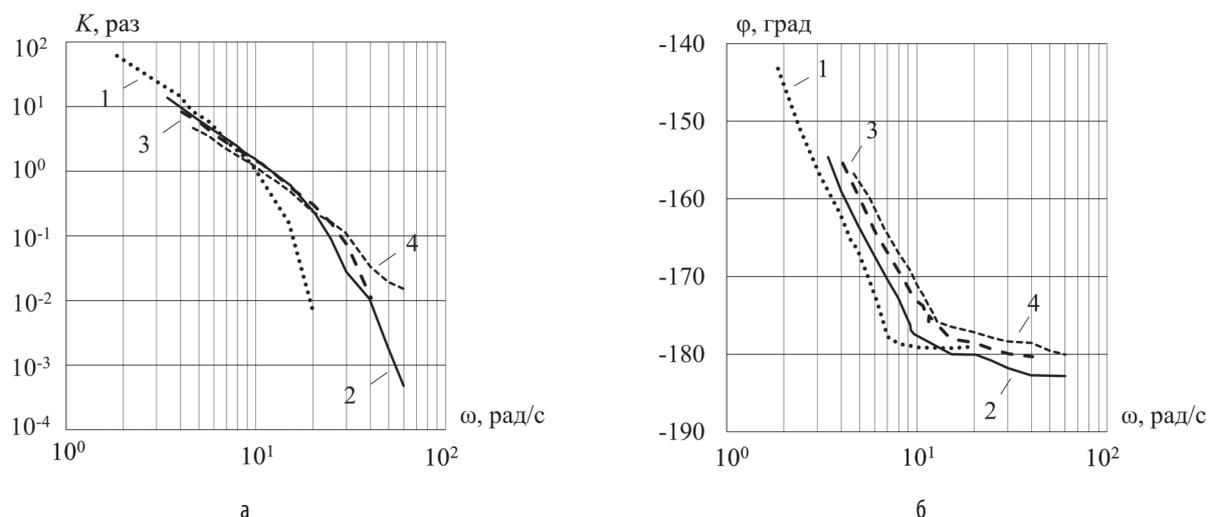


Рис. 8. Семейство результирующих характеристик полученных при различных амплитудах входных тестовых сигналов (1 — $U_1 = 15$ дел; 2 — $U_2 = 65$ дел; 3 — $U_3 = 125$ дел; 4 — $U_4 = 205$): а — ЛАЧХ; б — ЛФЧХ

Характеристики (K_1, φ_1) и (K_2, φ_2) на частотах наложения практически совпадают (см. рис. 7), при этом с помощью авторского метода удается получить более низкие частоты входных сигналов, а классическим методом — высокие частоты. Достоинством авторского метода является контроль над уходами ОУ за пределы диапазона значений выходных координат на низких частотах, в то время как при снятии ЛАФЧХ классическим методом уходы ОУ на одну из границ диапазона не происходят только на высоких частотах. Это позволяет для

данного объекта построить результирующие ЛАФЧХ в виде суммы двух характеристик. Используя это свойство, для искусственно ограниченного диапазона значений выходных координат $\pm 5^\circ$, экспериментально получено семейство результирующих ЛАФЧХ, которое представлено на рис. 8. Диапазон рабочих частот при авторском методе составил от 1,85–4,06 до 7,11–12,78 рад/с, а при классическом методе от 8–15 до 20–60 рад/с. При этом полностью исключались уходы ОУ за границы ограниченного диапазона.

ЛАЧХ, снятая при сигнале $U_1 = 15$ дел, имеет существенный завал на высоких частотах (рис.8, а), что объясняется наличием в ЭП нелинейности типа «зона нечувствительности», как было отмечено ранее. С ростом амплитуды входного сигнала завал уменьшается. В середине диапазона рабочих частот наблюдается достаточно высокое совпадение ЛАФЧХ, полученных при входных сигналах с амплитудами $U_{2,3} = 65$ и 125 дел, а при сигнале $U_4 = 205$ дел ЛАЧХ ниже остальных, что объясняется влиянием насыщения при максимальных амплитудах входного сигнала. Исходя из этого, подтверждается ранее сделанный выбор амплитуды входного сигнала $U_3 = 125$ дел и снятой с его помощью ЛАФЧХ для проведения дальнейшей идентификации ЭП. В случае, когда требуется более точная модель ЭП, необходимо использовать все семейство ЛАФЧХ.

5. Определение передаточной функции ЭП и восстановление полной РХ.

По результирующей ЛАФЧХ, полученной при амплитуде входного сигнала $U_3 = 125$ дел, проведена идентификация [9–11] исследуемого электропривода и определена его передаточная функция:

$$G(s) = \frac{K}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)},$$

где $K = 76,929$ — коэффициент передачи по скорости, c^{-1} ; $T_1 = 0,0063156$, $T_2 = 0,50771$ — постоянные времени, с.

С использованием коэффициента $K = 76,929 c^{-1}$ восстановлена РХ установившейся скорости. Для ее восстановления использовано выражение $y_v = y_{норм}(y_{уст.U_3} / y_{нормU_3})$, где $y_{норм}$ — текущее значение нормированной РХ ($\dot{y}_{норм}$, см. рис. 5); $y_{уст.U_3} = KU_3 = 9616$ дел/с — установившееся значение РХ при входном сигнале $U_3 = 125$ дел; $y_{нормU_3} = 0,813$ — значение нормированной РХ ($\dot{y}_{норм}$, см. рис. 5) при входном сигнале $U_3 = 125$ дел. Значения нормированной РХ ($y_{норм}$, $y_{нормU_3} = 0,813$) можно получить с использованием данных табл. 1, формул полиномиальной или кусочно-линейной аппроксимаций, а также выражения $\dot{y}_{норм} = \dot{y} / \dot{y}_{max.э}$.

Восстановленная \dot{y}_v и измеренная $\dot{y}_и$ РХ установившейся скорости (см. табл. 1), представлены на рис. 9, а.

Максимальное отклонение N_{max} восстановленной РХ от измеренной составляет 22,02 %, а среднеквадратичное отклонение $N_{СКВ}$ — не более 13,67 %. При этом начальный участок характеристик, на котором отклонение не превышает 5 %, наблюдается вплоть до сигнала $x = 95$ дел, а до 10 % — $x = 125$ дел. С учетом, что идентификация проведена при амплитуде входного сигнала $U_3 = 125$ дел, верхний участок РХ можно принять за зону насыщения и ввести ограничение на скорость ЭП. Причем за уровень ограничения целесообразно принять значение восстановленной РХ при входном сигнале $x = 125$ дел. В таком случае получим $\dot{y}_{огр} = KU_3 = 76,929 \cdot 125 = 9616$ дел/с (рис.9, а).

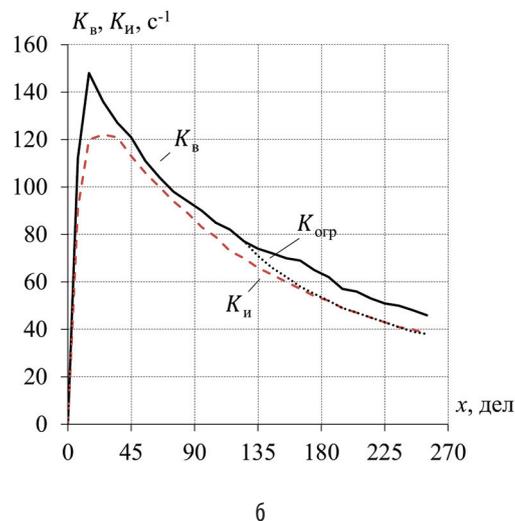
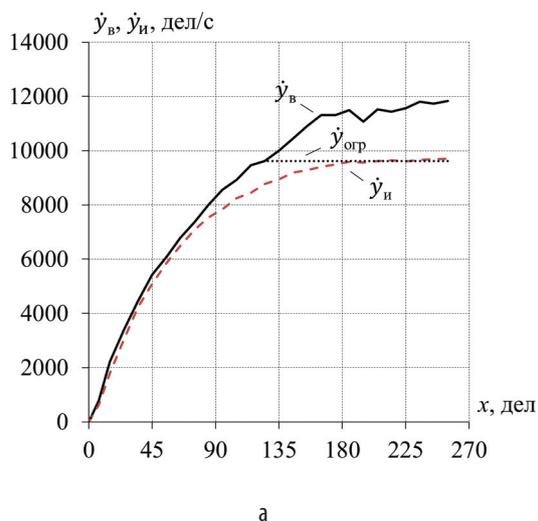
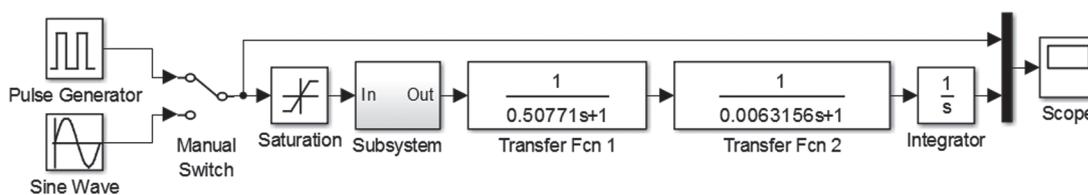
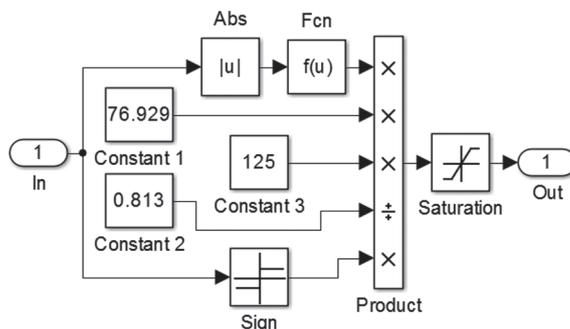


Рис. 9. Характеристики, полученные различными методами: а — РХ; б — переменный коэффициент передачи



a



б

Рис.10. Схемы моделирования: а — ЭП; б — блок вычисления переменного коэффициента передачи

С учетом ограничения скорости максимальное отклонение N_{max} восстановленной РХ от измеренной составит 10,49 %, а среднеквадратичное отклонение $N_{СКВ}$ — не более 4,28 %.

С использованием восстановленной РХ (см. рис. 9, а) был восстановлен переменный коэффициент передачи ЭП во всем диапазоне регулирования. Для восстановления использовано выражение $K_v = y_v / x$, где y_v — текущее значение восстановленной РХ; x — текущее значение входного сигнала. Измеренный K_u и восстановленный K_v коэффициенты передачи ЭП приведены на рис. 9, б. Здесь же показан ограниченный $K_{огр}$ коэффициент передачи ЭП, с учетом которого максимальное отклонение от измеренного N_{max} составляет 18,92 %, а среднеквадратичное отклонение $N_{СКВ}$ не превышает 5,71 %. При этом максимальные отклонения характеристики (см. рис. 9, б) наблюдаются на начальном участке и возникают из-за влияния зоны нечувствительности ($x_i = \pm 7$ дел).

6. Моделирование работы ЭП.

Для проверки работы ЭП в среде Simulink пакета MATLAB была составлена схема моде-

лирования [12–14], которая представлена на рис. 10, а.

Схема (см. рис.10, а) содержит: задающее устройство, состоящее из генератора импульсов *Pulse Generator*, генератора гармонического сигнала *Sine Wave* и двухканального переключателя *Manual Switch*; блок *Saturation* с параметрами *Upper limit* = 255 и *Lower limit* = -255 для ограничения входного сигнала; блок *Subsystem*, реализующий переменный коэффициент передачи; блоки *Transfer Fcn 1*, *Transfer Fcn 2* и *Integrator* для реализации звеньев передаточной функции $G(S)$. Блок переменного коэффициента передачи *Subsystem* (см. рис. 10, б) содержит блок вычисления модуля *Abs*, функциональный блок *Fcn* для вычисления $\dot{y}_{акл}$, три источника постоянного сигнала *Constant 1–3*, блок определения знака *Sign*, блок умножения и деления *Product*, блок *Saturation* с параметрами *Upper limit* = 9616 и *Lower limit* = -9616 для ограничения выходного сигнала. Источник *Constant 1* имитирует ввод K , источник *Constant 2* имитирует ввод $y_{нормU3}$, источник *Constant 3* имитирует ввод U_3 , а блок *Product* решает уравнение $y_v = y_{норм}(KU_3 / y_{нормU3})$.

Схема моделирования (см. рис. 10, а) позволяет получить различные временные и частотные характеристики. Для получения РХ \dot{y}_m , аналогичной измеренной \dot{y}_n (см. рис. 9, а), на вход модели с помощью блока *Pulse Generator* подавались ступенчатые сигналы x_i равномерно изменяемой амплитуды 15–255 дел с шагом изменения 10 дел. Период T_i входного сигнала не ограничивался, а выбирался, исходя из условия достижения выходным сигналом \dot{y}_i установившегося значения. Наблюдение и запись входных и выходных сигналов при моделировании осуществлялось блоком *Scope*.

Примеры выходных сигналов модели $\dot{y}_{i,m}$ и реального ЭП $\dot{y}_{i,n}$ при входном сигнале амплитудой $x_i = \pm 125$ дел для периода $T_i = 6,18$ с приведены на рис. 11, а.

С помощью СПО, разработанного в среде MATLAB, построена РХ модели \dot{y}_m и реального ЭП \dot{y}_n , которые приведены на рис. 11, б.

Путем программного изменения частоты входного сигнала с амплитудой $U_3 = 125$ дел

классическим методом получены ЛАФЧХ модели ЭП, которые вместе с комбинированной ЛАФЧХ реального ЭП приведены на рис. 12. Характеристики модели и реального ЭП имеют хорошее совпадение. Отличие наблюдается на высоких частотах, где начинают проявляться нелинейные свойства ЭП, обусловленные наличием зоны нечувствительности.

Проведена проверка точности воспроизведения параметров ЭП (РХ и ЛАФЧХ) при моделировании относительно реально измеренных и определены максимальные и среднеквадратичные отклонения, которые представлены в табл. 4.

Анализируя рис. 11–12 и табл. 4, можно сделать следующие выводы. Среднеквадратичные отклонения РХ реального ЭП и его модели не превышают 3,57 %, что согласуется с рекомендациями [1]. Величины $p_{скв}$ (ЛАЧХ составляет 4,57 %, ЛФЧХ — 2,21 %) не превышают рекомендуемое значение в 3–5 %. Вместе с тем следует отметить, что p_{max} ЛАЧХ составляет 9,81 %

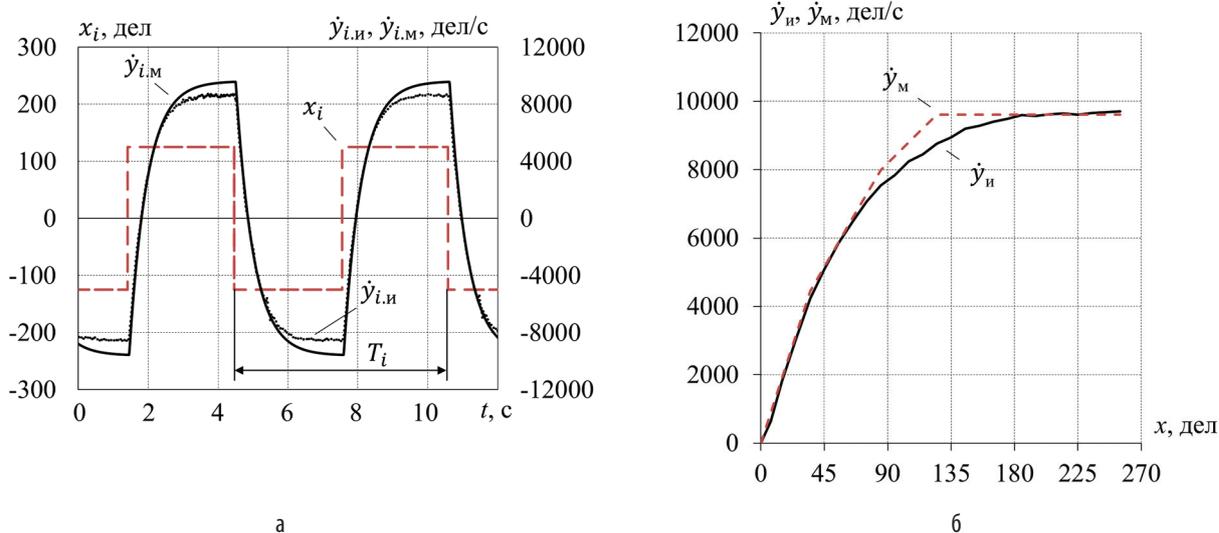


Рис. 11. Результаты моделирования: а — входные и выходные сигналы при определении \dot{y}_m ; б — РХ установившейся скорости модели и реального ЭП

Таблица 4

Отклонения характеристик реального ЭП и его модели

РХ (полная)		ЛАФЧХ			
		ЛАЧХ		ЛФЧХ	
p_{max}	$p_{скв}$	p_{max}	$p_{скв}$	p_{max}	$p_{скв}$
8,72 %	3,57 %	9,81 %	4,57 %	3,53 %	2,21 %

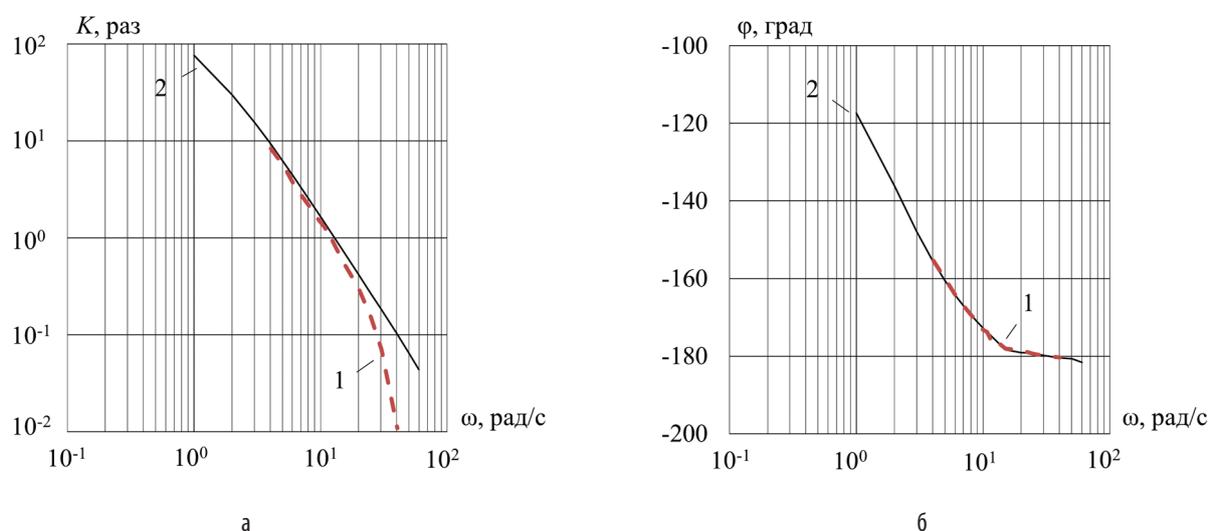


Рис. 12. Характеристики (1 — комбинированная реальная ЭП; 2 — модели ЭП), полученные при амплитуде входного тестового сигнала $U_3 = 125$ дел: а — ЛАЧХ; б — ЛФЧХ

и превышает рекомендуемые 3–5 %, однако, как видно из моделирования, существенные отклонения в основном возникают при обработке высокочастотных сигналов, где амплитуда выходных сигналов становится соизмерима с шириной зоны нечувствительности. Величина p_{max} РХ составляет 8,72 % и на идентификацию существенного влияния не оказывает.

Выводы.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Применение авторского метода для идентификации ЭП с асинхронным двухфазным двигателем, работающего в заданном диапазоне значений выходных координат, позволяет снять и построить различные РХ и определить параметры нелинейностей, характеризующих привод. Использование специальных алгоритмов [1] позволило получить аналитические выражения нормированных РХ и провести их аппроксимацию. Кроме того, были определены амплитуды тестовых сигналов, необходимые для снятия различных ЛАФЧХ и получения передаточной функции ЭП. Параметры нормированной РХ максимальной скорости и передаточной функции привода позволили аналитически воспроизвести РХ установившейся скорости и восстановить текущие значения переменного коэффициента передачи ЭП при регулировании.

Проведена сравнительная оценка РХ установившейся скорости и коэффициента передачи ЭП полученных различными методами: авторским (диапазон значений выходных координат ограничен) и традиционным (диапазон значений выходных координат не ограничен). Не смотря на десятикратное уменьшение рабочего диапазона (от $\pm 50^\circ$ до $\pm 5^\circ$), получено близкое совпадение характеристик (среднеквадратичное отклонение РХ 4,28 % и коэффициента передачи ЭП 5,71 %).

Результаты идентификации использованы для создания модели ЭП, адекватной по поведению реальному приводу. Экспериментальные и полученные путем моделирования параметры ЭП достаточно хорошо совпадают (среднеквадратичные отклонения для РХ не превышают 3,57 %, ЛАЧХ — 4,57 %, ЛАФХ — 2,21 %) и тем самым позволяют приблизить поведение модели к поведению реального ЭП. Используемый метод реализован с применением современных информационных технологий, доведен до инженерного уровня и проверен экспериментально. Результаты моделирования подтверждают высокую эффективность авторского метода исследования нелинейного ЭП, в связи с чем, делается вывод о возможности его применения для идентификации других нелинейных ОУ.

Литература:

1. Стрижнев, А. Г. Метод исследования нелинейных объектов управления, работающих в заданном диапазоне значений выходных координат / А. Г. Стрижнев, А. А. Шихов, А. Н. Русакович // Информатика. — 2015. — № 3. — С. 94–102.
2. Архангельский, А. Я. C++ Builder 6 : справ. пособие в 2 ч. / А. Я. Архангельский. — М.: Бином-Пресс, 2002.
3. Hollingworth, J. Borland C++ Builder 6 Developer's Guide: 2nd edition / J. Hollingworth. — Indianapolis: Sams, 2002. — 1128 p.
4. Дьяконов, В. П. MATLAB7.*/R2006/R2007: Самоучитель / В. П. Дьяконов. — М.: ДМК Пресс, 2008. — 768 с.
5. Curve Fitting Toolbox: User's Guide [Electronic resource] / Mathworks, 2015. — Mode of access: http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/curvefit/curvefit.pdf. — Date of access: 21.03.2015.
6. Гроп, Д. Методы идентификации систем / Д. Гроп. — М.: Мир, 1979. — 302 с.
7. Красовский, А. Я. Локальные системы автоматики / А. Я. Красовский. — Минск: БГУИР, 2007. — 181 с.
8. Пупков, К. А. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — Т. 2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления. — 640 с.
9. Марков, А. В. Параметрическая идентификация динамических объектов по фазочастотным характеристикам / А. В. Марков, В. И. Симаньков // Доклады БГУИР. — 2015. — № 3 (89). — С. 29–35.
10. Ljung, L. System Identification: Theory for the User / L. Ljung. — New Jersey: Prentice Hall, 1999. — 672 p.
11. Ljung, L. System Identification Toolbox: User's Guide / L. Ljung. — Natick: Mathworks, 2005. — 886 p.
12. Терехин, В. В. Основы моделирования в MATLAB. Simulink: учеб. пособие в 2 ч. / В. В. Терехин. — Новокузнецк: Кузбассвуиздат, 2004. — Ч. 2. — 376 с.
13. Tewari, A. Modern control design with MATLAB and Simulink. / A. Tewari. — Weinheim: Wiley, 2002. — 503 p.
14. Nuruzzaman, M. Modeling and Simulation in Simulink for Engineers and Scientists / M. Nuruzzaman. — Bloomington: AuthorHouse, 2005. — 240 p.