

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.382.3

А.Г. Стрижнев¹, А.А. Шихов¹, А.Н. Русакович²**МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ
УПРАВЛЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ В ЗАДАННОМ ДИАПАЗОНЕ
ВЫХОДНЫХ КООРДИНАТ**

Предлагается метод исследования нелинейных объектов управления (ОУ), работающих в заданном диапазоне значений выходных координат. Рассматривается влияние существующих нелинейностей на работу ОУ, которое может быть определено по различным регулировочным характеристикам (РХ). Описываются новые подходы к снятию и построению регулировочных и логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик (ЛАФЧХ). Разрабатывается специальный алгоритм тестирования, позволяющий провести полный цикл идентификации ОУ, построить комбинированную ЛАФЧХ, восстановить полную РХ и переменный коэффициент передачи, получить модель, близкую к поведению реального ОУ. Предложенный метод использовался при исследованиях реальных ОУ и показал свою высокую эффективность.

Введение

Большинство технических ОУ являются нелинейными. К наиболее часто встречающимся нелинейностям относят зону нечувствительности, зону насыщения, нелинейный коэффициент усиления, неуравновешенность (несбалансированность) механизмов, люфты и зазоры зубчатых передач и др. [1–4]. Определение характера нелинейностей и получение аналитических выражений, которыми они могут быть описаны, является важной задачей, позволяющей в дальнейшем не только проводить высокоточное моделирование работы всей системы, но и осуществлять синтез регуляторов, удовлетворяющих заданным критериям качества управления.

Выявить существующие нелинейности [5] проще всего по статической РХ [6], которая представляет собой зависимость установившихся значений выходной величины y от входной величины x . На практике наиболее часто используются РХ по положению, скорости и ускорению. Для ОУ, работающих в широком диапазоне выходных координат, снятие РХ не представляет большой проблемы. Однако для ОУ, работающих в узком диапазоне значений выходных координат, этот процесс может вызывать серьезные трудности. Дело в том, что при подаче ступенчатых входных сигналов на ОУ, работающие в узком диапазоне, выходная величина y не успевает достичь установившегося значения. Кроме того, при подаче входных сигналов большой амплитуды могут происходить удары ОУ об ограничители (упоры) и, как следствие, поломка техники.

Для преодоления указанных трудностей и решения ряда других задач был разработан новый метод исследования нелинейных ОУ, работающих в заданном диапазоне значений выходных координат. Метод содержит несколько последовательно выполняемых этапов: снятие и построение РХ и ЛАФЧХ, определение передаточной функции ОУ. Для уяснения сути данного метода необходимо раскрыть содержание этапов и определить условия его практического применения.

1. Снятие и построение РХ

При снятии РХ (рис. 1, а) на вход ОУ подают ступенчатые сигналы x_i равномерно изменяемой амплитуды и, не доходя 5–10 % до максимума заданного диапазона $|y_{\max}|$ выходной координаты y , в точке $|D|$ осуществляют изменение знака входных сигналов x_i (координаты точки $|D|$ в процессе снятия РХ не изменяют). При этом образуются входные сигналы x_i ,

имеющие форму меандра, с периодом повторения T_i , а выходные сигналы y_i оказываются «привязанными» к рабочему диапазону $[-y_{\max}; y_{\max}]$. Изменение амплитуды ступенчатых сигналов осуществляют через каждый цикл сканирования $T_{\text{цс}}$, минимальное время которого получается при движении в одну и другую сторону. Шаг изменения амплитуды входных сигналов x_i выбирают таким, чтобы получить достаточное число (обычно 20–30) точек РХ в диапазоне изменения $[-x_{\max}; x_{\max}]$ входной координаты. При реверсировании движения в точке $|D|$ возникают выбеги y_e [7], которые могут приводить к ударам механизмов ОУ об ограничители при подаче максимальных $|x_{\max}|$ входных сигналов. Этим и объясняется уменьшение координаты точки переключения $|D|$ на 5–10 % относительно максимума $|y_{\max}|$.

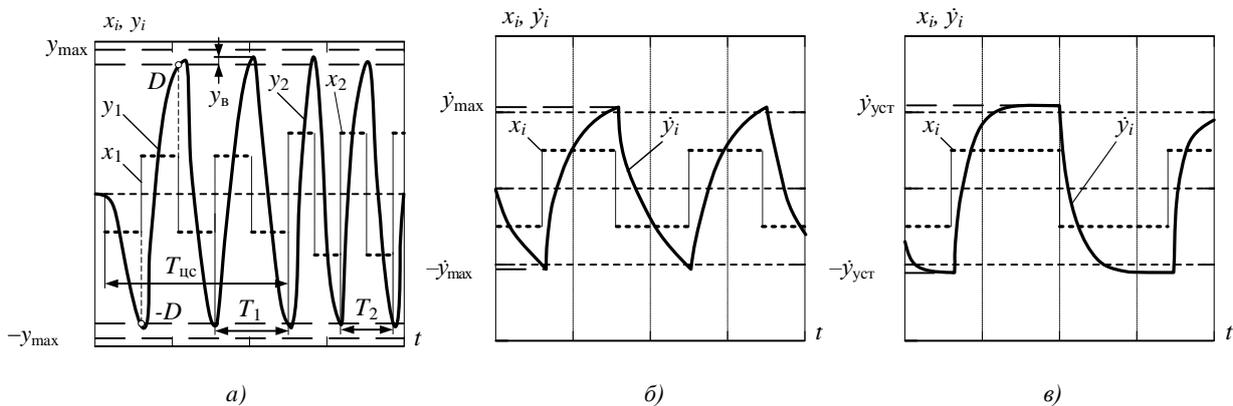


Рис. 1. Входные и выходные сигналы при снятии РХ: а) выбор точки реверсирования; б) определение максимальной скорости; в) определение установившейся скорости

В зависимости от диапазона выходной координаты $|y_{\max}|$ и инерционных свойств ОУ на его выходе могут образоваться максимальные или установившиеся значения выходной величины, которые затем используют для построения соответствующих РХ. В качестве примера на рис. 1, б приведены максимальные \dot{y}_{\max} , а на рис. 1, в – установившиеся $\dot{y}_{\text{уст}}$ значения выходной величины (скорости) астатического ОУ. Следует заметить, что максимальные значения отличаются от установившихся тем, что при условном увеличении координаты точки $|D|$ реверсирования максимальные значения \dot{y}_{\max} продолжали бы возрастать до установившейся величины $\dot{y}_{\text{уст}}$. Полученные таким образом максимальные или установившиеся значения выходных координат используют для построения соответствующих РХ и определения существующих нелинейностей. При этом помимо ранее перечисленных нелинейностей целесообразно проверить несимметричность положительной и отрицательной ветвей РХ, появление которой может быть вызвано, например, различной степенью износа шестерен или неуравновешенностью исполнительного механизма.

Для оценки несимметричности можно использовать выражение приведенной погрешности [8]:

$$N = \frac{y_3 - y_n}{y_{\max, \varepsilon}} \cdot 100 \% , \quad (1)$$

где $y_3 = y^+$ – эталонное значение РХ; $y_n = |y^-|$ – измеренное значение РХ; $y_{\max, \varepsilon} = y_{\max, \text{РХ}}^+$ – максимальное эталонное значение РХ. Знак плюс указывает на положительную ветвь РХ, а знак минус – на отрицательную. Применительно к вращательному движению принято считать, что положительная ветвь РХ образуется при вращении ОУ по часовой стрелке, а отрицательная – против часовой стрелки. Следует заметить, что окончательная оценка несимметричности осу-

ществляется по максимальному N_{\max} и среднеквадратичному $N_{\text{скв}}$ значениям несимметричности [8]:

$$N_{\max} = \max(|N_i|); N_{\text{скв}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i^2}, \quad (2)$$

где N_i – текущее значение несимметричности; n – количество измеренных точек.

Несимметричность (1) считается допустимой, если среднеквадратичное значение N не превышает 3–5 %. При таких отклонениях N РХ считается симметричной и используется только ее положительная ветвь, в противном случае необходимо проводить исследование обеих ветвей РХ.

Для дальнейших исследований полученную ограниченную (с применением максимальных значений рис. 1, б) или полную (с применением установившихся значений рис. 1, в) РХ необходимо нормировать относительно максимального значения используемой РХ с помощью выражения

$$y_{\text{норм}} = y / y_{\max.\text{РХ}}, \quad (3)$$

где y , $y_{\max.\text{РХ}}$ – текущее и максимальное значения РХ.

После нормирования нужно провести аппроксимацию используемой РХ. Обычно применяется полиномиальная (рис. 2, а) либо кусочно-линейная (рис. 2, б) аппроксимация.

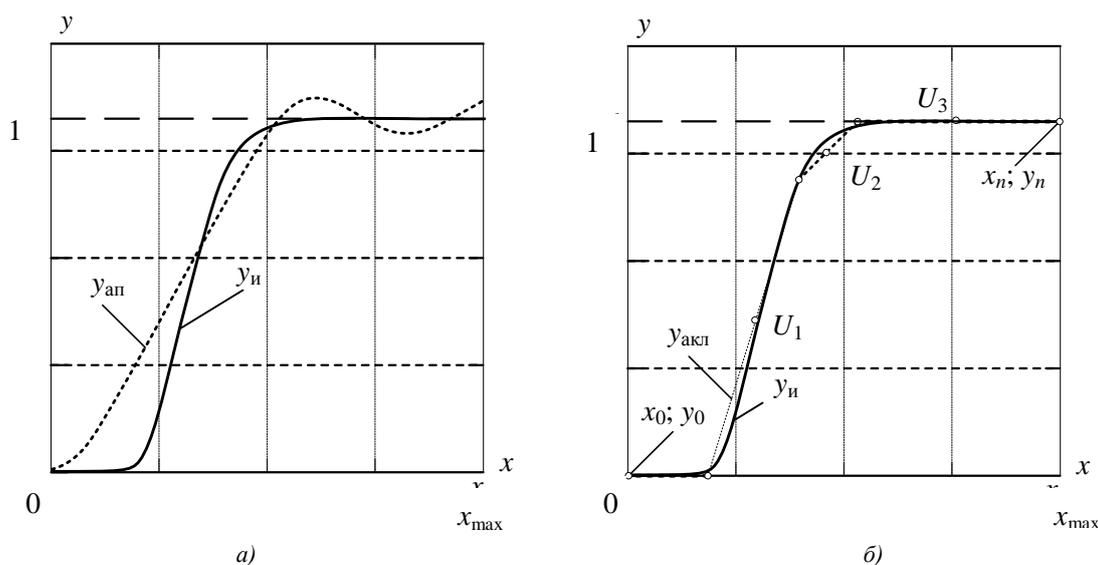


Рис. 2. Аппроксимация РХ: а) полиномиальная; б) кусочно-линейная

Выражение полиномиальной аппроксимации имеет вид [9]

$$y_{\text{ап}} = c_0 x^0 + c_1 x^1 + c_2 x^2 + \dots + c_n x^n, \quad (4)$$

где x – текущее значение входного сигнала; c_i – коэффициенты полинома.

Степень n полинома (4) может быть любой и выбирается исходя из требуемой точности аппроксимации, которая определяется по выражению, аналогичному (1):

$$p = \frac{y_i - y_a}{y_{i.\max}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где p – приведенное отклонение; y_i – измеренное значение; $y_{i, \max} = 1$ – максимальное измеренное значение; y_a – аппроксимированное значение.

Окончательная оценка аппроксимации осуществляется по максимальному и среднеквадратичному значениям, которые вычисляются по выражениям, аналогичным (2).

В случаях когда РХ имеет сложную форму, она может быть аппроксимирована с требуемой точностью только полиномами высоких порядков, которые сложны в вычислении. В такой ситуации предпочтительнее применять кусочно-линейную аппроксимацию, которую обычно представляют отдельными формулами на каждом из интервалов регулирования, а если РХ непрерывная, то целесообразно использовать выражение [10]

$$y_{\text{акт}} = \frac{1}{2} \left[y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0) + y_{n-1} + \frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} (x - x_{n-1}) \right] + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} - \frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \right) |x - x_k|, \quad (6)$$

где n – количество линейных участков РХ (см. рис. 2, б).

Количество участков кусочно-линейной функции (6) может быть любым. Оно выбирается исходя из того, чтобы среднеквадратичное значение отклонения (2), (5) не превышало 3–5 %.

Кусочно-линейная аппроксимация используется для выбора амплитуды U_i тестовых гармонических сигналов $x = U \sin \omega t$ изменяемой частоты ω , которые в дальнейшем применяют для снятия и построения семейства ЛАФЧХ [11]. В качестве U_i предлагается выбирать середины $U_1 - U_3$ линейных участков аппроксимированной РХ.

2. Снятие и построение ЛАФЧХ

Как было отмечено ранее, из-за наличия нелинейностей, главной из которых является неуравновешенность нагрузки, неизбежно приводящая к произвольному уходу ОУ на одну из границ выходного диапазона и столкновению его с ограничительными упорами, процесс получения РХ становится затруднительным или невозможным. По этой же причине нельзя на низких частотах использовать гармонические тестовые сигналы для снятия и построения ЛАФЧХ. Решить данную проблему можно, изменяя координаты точки реверсирования D_i (рис. 3, а) от минимальной до максимально возможной величины и тем самым обеспечивая регулирование частоты ($f_i = 1/T_i$) входных и выходных сигналов ОУ. Однако данный метод в сравнении с классическим [6] обеспечивает получение характеристик в более узком диапазоне частот. Это объясняется тем, что нижняя (низкочастотная) граница диапазона ограничена выходным сектором перемещения ОУ, который определяет максимально возможное значение точки D_i . Верхняя же частотная граница определяется минимально возможным значением точки D_i , которое ограничено минимальным значением выходной координаты, измеряемой датчиком. Для решения данной проблемы предлагается комбинация предложенного и классического методов получения ЛАФЧХ с учетом того, что уходы ОУ на одну из границ диапазона при снятии характеристик наблюдаются преимущественно в низкочастотной области. На высоких частотах времена циклов сканирования $T_{\text{цс}}$ и амплитуды колебаний u достаточно малы и вследствие уходов ОУ не успевают достичь границ сектора перемещения. Таким образом, предлагается в низкочастотной области использовать предложенный метод снятия характеристик, а в высокочастотной – классический метод [6]. Для получения результирующих характеристик требуется совместить ЛАФЧХ (L_1, φ_1), полученные с помощью предложенного метода, и ЛАФЧХ (L_2, φ_2), полученные с помощью классического метода (рис. 3, б).

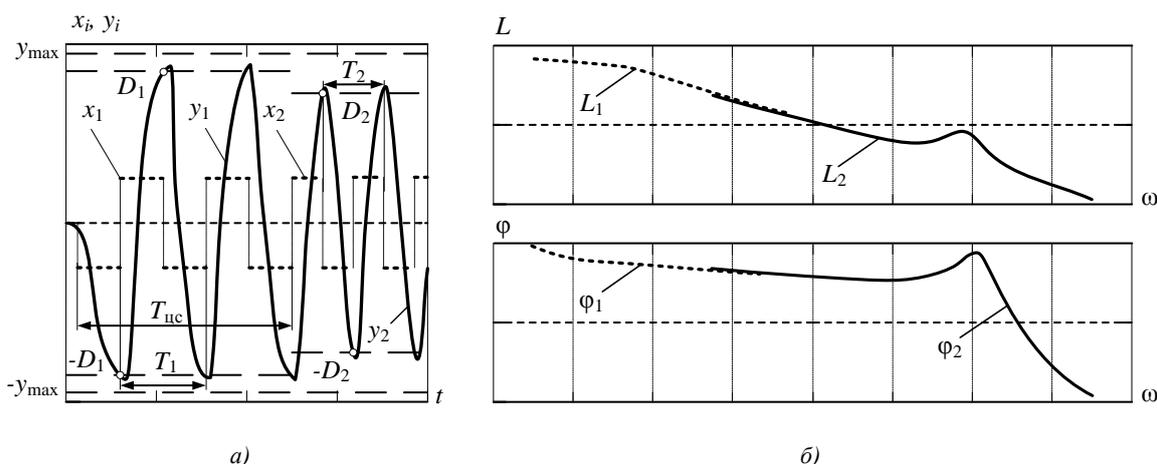


Рис. 3. Частотные характеристики:

а) входные и выходные сигналы; б) результирующая ЛАФЧХ

Следует отметить, что при использовании предложенного метода образуются входные и выходные сигналы, которые не являются гармоническими, и для построения ЛАФЧХ требуется определять параметры их первых гармоник.

Полученные таким образом результирующие ЛАФЧХ позволяют не только более точно определить передаточную функцию ОУ, но и восстановить полную РХ.

Передаточную функцию можно определить в упрощенном виде, используя графический метод либо метод узловых частот [12]. Если требуется более точная передаточная функция, можно, задаваясь порядком или структурой ОУ, воспользоваться известными методами параметрической идентификации [13–16] либо автоматизированными методами, которые предлагаются, например, в пакете MATLAB [17].

Восстановление полной РХ рассмотрим на примере астатического ОУ, имеющего передаточную функцию $G(s) = K[s(Ts + 1)]^{-1}$, где K – коэффициент передачи, T – постоянная времени. Следует заметить, что коэффициент передачи K характеризует отношение установившегося значения выходного сигнала к амплитуде тестового входного синусоидального сигнала на частоте $\omega = 1$, т. е. $K = y_{уст.U_i} / U_i |_{\omega=1}$ или $y_{уст.U_i} = KU_i |_{\omega=1}$.

Следовательно, можно записать выражение для восстановления полной РХ:

$$y_B = y_{норм} \frac{y_{уст.U_i}}{y_{норм.U_i}}, \tag{7}$$

где $y_{норм}$ – текущее значение нормированной РХ, которое определяется по выражению (3); $y_{уст.U_i} = KU_i$ – установившееся значение РХ при входном сигнале U_i ; $y_{норм.U_i}$ – нормированное значение РХ при входном сигнале U_i ; K – коэффициент передачи ОУ при входном сигнале U_i .

С помощью выражения (7) можно восстановить переменный коэффициент передачи ОУ во всем диапазоне входных сигналов:

$$K_B = \frac{y_B}{x}, \tag{8}$$

где y_B – восстановленное значение выходной величины, рассчитанное по выражению (7); x – амплитуда входного сигнала.

Выражения (7), (8) позволяют восстановить полную РХ, определить переменный коэффициент передачи и получить модель, адекватную по поведению реальному нелинейному ОУ.

Предложенный метод и его этапы характеризуются сложным вычислительным процессом и рассчитаны на применение современных информационных технологий.

3. Разработка специального алгоритма тестирования

Для автоматизации процессов исследования нелинейных ОУ, работающих в заданном диапазоне выходных координат, и реализации этапов предложенного метода был разработан специальный алгоритм тестирования (рис. 4).

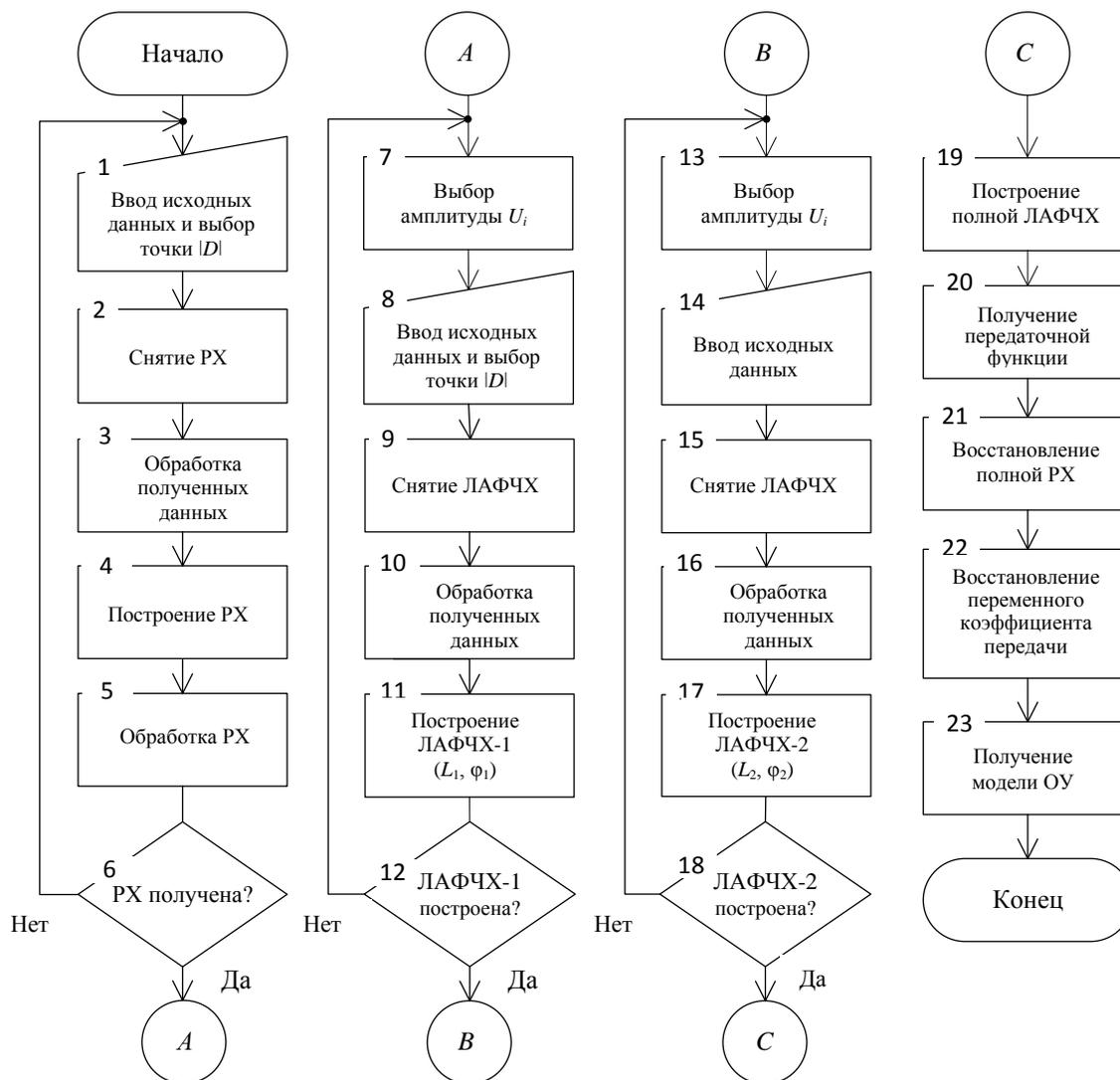


Рис. 4. Алгоритм исследования нелинейных ОУ, работающих в заданном диапазоне выходных координат

Алгоритм состоит из четырех этапов: снятие и построение РХ, снятие и построение ЛАФЧХ-1, снятие и построение ЛАФЧХ-2, построение комбинированной ЛАФЧХ и получение модели ОУ.

В начале этапа снятия и построения РХ в блоке 1 осуществляется выбор точки $|D|$ реверсирования и ввод исходных данных: диапазона и шага изменения входных сигналов x_i , количества движений в одном цикле сканирования $T_{ис}$, допустимого диапазона выходных координат y_{max} . Значение точки $|D|$ может быть установлено оператором или определено

автоматически. При автоматическом определении подается максимальный входной сигнал с начальной координатой точки $|D|$, примерно равной 50 % от максимального диапазона y_{\max} , а затем значение точки $|D|$ постепенно увеличивается на 10 % до значения, исключающего выход ОУ за границу заданного диапазона. Для снятия РХ в блоке 2 производится формирование, подача и запись входных и выходных сигналов ОУ. Полученные входные и выходные данные подаются в блок 3, где осуществляются дифференцирование, фильтрация, усреднение и определение максимальных и установившихся значений выходной величины. В блоке 4 происходит построение снятой РХ, которая затем подвергается проверке на несимметричность, нормированию и аппроксимации (блок 5). Полученная РХ является базовой характеристикой для перехода к этапам построения ЛАФЧХ-1 и ЛАФЧХ-2.

На втором этапе реализуется новая методика снятия ЛАФЧХ-1 в низкочастотной области, изложенная в разд. 2. При этом необходимо соблюдать следующую последовательность действий. Используя полученную на первом этапе аппроксимированную РХ, в блоке 7 определяются амплитуды входных тестовых сигналов U_i , которые поступают в блок 8. Кроме того, в блоке 8 вводятся исходные данные: диапазон и шаг изменения точки $|D|$, количество периодов движения в одном цикле сканирования. В блоке 9 осуществляются формирование, подача и запись входных и выходных сигналов ОУ, которые обрабатываются в блоке 10 с выделением первых гармоник, а затем используются в блоке 11 для построения ЛАФЧХ-1.

На третьем этапе реализуется классическая методика снятия ЛАФЧХ-2 в высокочастотной области. При этом методе снятия частотной характеристики последовательность действий в блоках 13–18 практически аналогична действиям в блоках 7–12. В блоке 13 определяются амплитуды входных тестовых сигналов U_i , эквивалентные амплитудам, определяемым в блоке 7. В блоке 14 вводятся исходные данные: диапазон и шаг изменения частоты, количество периодов движения в одном цикле сканирования. В блоке 15 осуществляются формирование, подача и запись гармонических входных и выходных сигналов ОУ, которые обрабатываются в блоке 16, а затем используются в блоке 17 для построения ЛАФЧХ-2.

На четвертом этапе построенные ЛАФЧХ-1 и ЛАФЧХ-2 поступают в блок 19, где происходит их объединение и образование результирующей (комбинированной) ЛАФЧХ. С помощью полученной ЛАФЧХ в блоке 20 осуществляются структурная и параметрическая идентификация и получение передаточной функции ОУ. Затем с помощью блоков 21–23 последовательно происходит восстановление полной РХ, переменного коэффициента передачи K_i и получение более точной модели ОУ.

Данный алгоритм позволяет проводить полный цикл идентификации ОУ, работающих в заданном диапазоне выходных координат, и может быть реализован в виде программного комплекса с помощью современных языков программирования высокого уровня.

Заключение

Разработан метод исследования ОУ, работающих в заданном диапазоне выходных координат, который позволяет осуществлять снятие и построение различных РХ, их нормирование и аппроксимацию, а также снятие и построение ЛАФЧХ в заданном диапазоне выходных координат без опасности уходов и ударов механизмов ОУ об ограничители. Для более полного изучения свойств ОУ в широком диапазоне частот предложена комбинированная амплитудно-фазовая частотная характеристика, получаемая с помощью предложенного и классического методов. Предложенный метод также позволяет восстановить полную РХ, определить переменный коэффициент передачи ОУ и получить модель, адекватную по поведению реальному нелинейному объекту.

Для автоматизации процесса исследования нелинейных ОУ, работающих в заданном диапазоне выходных координат, был разработан специальный алгоритм тестирования, который может быть реализован с помощью современных языков программирования высокого уровня. В дальнейшем планируется использовать разработанный метод для исследования различных нелинейных ОУ, сформировать правила и рекомендации практического характера.

Список литературы

1. Попов, Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления : учеб. пособие / Е.П. Попов. – 2-е изд. – М. : Наука, 1988. – 256 с.
2. Способ и цифровая следящая система для определения и компенсации влияний неуравновешенности нагрузки на работу следящих систем и приводов : евраз. пат. 016669, МПК G05B 11/00, G05B 19/406 / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.А. Шихов, С.Л. Ботеновский, И.А. Гончарук, С.М. Виноградов, Г.В. Кирячок; заявитель ООО «Техносоюзпроект». – № 201001761; заявл. 07.10.10; опубл. 29.06.12 // Бюл. евраз. пат. ведомства. – 2012. – № 6. – С. 1–5.
3. Стрижнев, А.Г. Повышение точности работы цифровой следящей системы, содержащей неуравновешенную нагрузку / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.А. Шихов // Наука и техника. – 2013. – № 5. – С. 10–14.
4. Лурье, Б.Я. Классические методы автоматического управления / Б.Я. Лурье, П.Дж. Энрайт. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 640 с.
5. Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования и управления / В.Д. Громыко [и др.]. – Минск : Выш. школа, 1973. – 584 с.
6. 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. – 640 с.
7. Машиностроение : энциклопедия : в 40 т. / под ред. К.С. Колесникова. – М. : Машиностроение, 1995. – Т. 1–3. – 624 с.
8. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
9. Бахвалов, Н.С. Численные методы : учеб. пособие для вузов / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. – 632 с.
10. Доля, П.Г. Об одном способе представления кусочных полиномов в системах символьной математики / П.Г. Доля // Вестник Харьк. нац. ун-та. – 2008. – Т. 833, № 10. – С. 110–120.
11. Борцов, Ю.А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.
12. Солодовников, В.В. Основы теории и элементы систем автоматического управления : учеб. пособие для вузов / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М. : Машиностроение, 1985. – 536 с.
13. Марков, А.В. Параметрическая идентификация динамических объектов по фазочастотным характеристикам / А.В. Марков, В.И. Симаньков // Доклады БГУИР. – 2015. – № 3(89). – С. 29–35.
14. Гроп, Д. Методы идентификации систем / Д. Гроп. – М. : Мир, 1979. – 302 с.
15. Ljung, L. System Identification: Theory for the User / L. Ljung. – New Jersey : Prentice Hall, 1999. – 672 p.
16. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. – М. : Мир, 1975. – 686 с.
17. Ljung, L. System Identification Toolbox: User's Guide / L. Ljung. – Natick : Mathworks, 2005. – 886 p.

Поступила 19.05.2015

¹НПООО «ОКБ Техносоюзпроект»,
Минск, пр. Независимости, 115
e-mail: skb@tspb.com

²Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
Минск, П. Бровки, 6
e-mail: shihovalex@gmail.com,
aliaksei.rusakovich@gmail.com

A.G. Stryzhniou, A.A. Shykhau, A.N. Rusakovich**METHOD OF INVESTIGATION OF NONLINEAR OBJECTS OPERATING
WITHIN SPECIFIED RANGE OF OUTPUT COORDINATES**

This article presents a method of investigation of nonlinear objects operating within specified range of output coordinates. The effect of nonlinear behavior of objects is considered, which is detected by measurable characteristics. New approaches to decibel-log frequency response measurement are proposed. Special testing method that realizes complete cycle of object identification is developed. The method is applied for investigation of real objects with high efficiency.