

УДК 621.3.07

**СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ С РЕДУЦИРОВАННЫМИ МОДЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА****В. О. Котляров, Л. А. Жилевская**Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина. E-mail: kotlyarov@kpi.kharkov.ua

Предложено применение методов редукции моделей динамических объектов для синтеза наблюдателей координат электромеханических систем с упругими связями. Рассмотрены три группы методов редукции – эвристические, основанные на физических соображениях, и формальные – вычеркивание корней характеристического полинома и сбалансированная реализация модели. Методы кратко описаны. Качество редукции демонстрируют приведенные графики переходных процессов. Дан сравнительный анализ результатов применения методов. Сделан вывод об эффективности этих методов для широкого круга электроприводов.

**Ключевые слова:** наблюдатели полного порядка, сравнение методов редукции, сбалансированная модель.

**СИНТЕЗ СПОСТЕРІГАЧІВ З РЕДУКОВАНИМИ МОДЕЛЯМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА****В. О. Котляров, Л. О. Жилевська**Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: kotlyarov@kpi.kharkov.ua

Запропоновано використання методів редукції моделей динамічних об'єктів для синтезу спостерігачів координат електромеханічних систем з пружними зв'язками. Розглянуто три групи методів редукції – евристичні, які обґрунтовано фізичними міркуваннями, та формальні – викреслювання коренів характеристичного поліному та збалансована реалізація моделі. Методи стисло описано. Якість редукції демонструють наведені графіки перехідних процесів. Надано порівняльний аналіз результатів застосування методів. Зроблено висновок про ефективність методів для широкого кола електроприводів.

**Ключові слова:** спостерігачі повного порядку, порівняння методів редукції, збалансована модель.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** При реализации систем управления недоступные прямому измерению координаты электропривода (ЭП) с упругими кинематическими связями зачастую оцениваются наблюдателями. Модель ЭП в наблюдателе влияет на его точность и сложность технической реализации. Такая модель должна иметь невысокий порядок и, вместе с тем, не давать больших ошибок наблюдения. Целью проведенного исследования является определение влияния разных методов редукции (понижения порядка) моделей ЭП на эти ошибки.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Среди методов редукции моделей выделяют [1]:

– эвристические методы – модель упрощается, исходя из физических и инженерных соображений. Типичный пример – суммирование моментов инерции в многомассовой механической системе;

– методы аппроксимации – передаточная функция объекта разлагается в ряд, например, Тейлора, после чего отбрасываются определенные члены ряда;

– методы вычеркивания – отбрасывается часть исходной модели, например, исключаются некоторые переменные состояния в матричном описании.

Для определения вычеркиваемых составляющих модели применяют ряд критериев. Такими критериями могут служить степени управляемости и наблюдаемости переменных состояния – переменные отбрасываются, если они слабоуправляемые и слабонаблюдаемые. При этом возможно сбалансированное представление модели, в котором отбрасываемые переменные одновременно и наименее управляемые, и наименее наблюдаемые.

Сравнение методов редукции применяемых в наблюдателях моделей ЭП было выполнено для наблюдателей координат двухмассовой электромеханической системы (ДЭМС), представленной сле-

дующими уравнениями:  $pI=(U_0-RI-C\omega_1)/L$ ;  $M=CI$ ;  $p\omega_1=(M-M_{12})/J_1$ ;  $pM_{12}=C_{12}(\omega_1-\omega_2)$ ;  $p\omega_2=(M_{12}-M_c)/J_2$ . Здесь  $p$  – оператор дифференцирования;  $U_0$  – управляющее воздействие;  $I, M$  – ток и момент двигателя,  $\omega_1, \omega_2$  – скорости первой и второй масс;  $M_{12}$  – упругий момент;  $M_c$  – возмущение;  $R, L$  – активное сопротивление и индуктивность электрической цепи;  $J_1, J_2$  – моменты инерции масс;  $C, C_{12}$  – коэффициенты электромеханической связи и упругости.

Для исследования были отобраны характерные сочетания параметров ДЭМС, представляющие широкий спектр электроприводов роботов, станков, проточных станков, транспортеров и т.п. Качество редукции определялось по временным и частотным зависимостям максимальных ошибок оценивания координат ДЭМС наблюдателями полного порядка с различными редуцированными моделями второго порядка. Модели редуцировались тремя способами.

Во-первых, кинематическая связь в модели принималась не упругой, а абсолютно жесткой. Это, как известно, может вести к качественным изменениям свойств модели, например, исходно колебательные процессы могут стать аperiodическими.

Во-вторых, из корней характеристического полинома ДЭМС  $D(p)$  оставлялась только доминирующая пара.  $D(p)$  представлялся произведением полиномов второго порядка  $D_1(p)D_2(p)$ , из которого вычеркивался сомножитель  $D_2(p)$  с левыми корнями. Тогда  $D(p)=D_1(p)=p^2+a_1p+a_0=p^2+1/T_1p+1/T_1T_2$ . Для удобства анализа моделей использовались традиционные выражения для параметров одномассовой ЭМС:  $T_1=1/a_1=L/R$ ,  $T_2=1/a_0T_1=J/\beta$ ,  $\beta=C^2/R$ , где  $J$  – момент инерции единственной массы;  $\beta$  – жесткость механической характеристики. Но в зависимости от доминирующей пары корней физический смысл постоянных времени  $T_1$  и  $T_2$  может быть различным, а

значения параметров  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $J$  после редукции могут существенно отличаться от исходных значений. Доминирующие корни задают постоянные времени и частоту собственных колебаний системы, но оставляют свободу выбора значений параметров модели, позволяя придавать ей и наблюдателю желаемые свойства. Например, приняв  $J$  равным сумме  $J_1+J_2$ , далее можно зафиксировать либо параметр  $R$ , либо параметр  $C$ , взяв их значения из исходной модели. Затем рассчитываются оставшиеся неопределенными параметры редуцированной модели. Разный порядок определения параметров ведет к разным статическим и динамическим ошибкам моделирования.

В-третьих, порядок модели уменьшался вдвое методом сбалансированной редукции средствами пакета Matlab (функция `balmr`). При этом в выход редуцируемой модели включались только заданные координаты, используемые в наблюдателе.

Сбалансированная редуцированная модель тем же способом может быть построена и для самого наблюдателя, т.е. модели объекта вместе с корректирующими связями. Это дает еще один способ понижения порядка наблюдателя.

Все три способа редукции заведомо ведут к ошибкам моделирования и наблюдения, но разным. Пример переходных функций для исходной модели ЭП четвертого порядка с параметрами  $R=0,28$ ;  $L=0,0028$ ;  $C=0,7$ ;  $C12=3$ ;  $J_1=0,1$ ;  $J_2=0,2$  и трех моделей, редуцированных перечисленными способами, дан на рис. 1,а (нумерация кривых – в порядке перечисления). Отличия наблюдателей с этими моделями иллюстрирует рис. 1,б, где показаны оценки скорости ДЭМС  $\omega_2$  наблюдателями с коррекцией по этой скорости и разными редуцированными моделями. В одном случае (кривая 2) в модели отброшена пара корней, в другом (кривая 3) использована сбалансированная модель. Видно, что эта модель дает меньшую динамическую ошибку наблюдения, но большую статическую. Почти всегда ошибки можно уменьшить, увеличивая быстродействие наблюдателя. Как пример, на рис. 1,в показаны оценки  $\omega_2$  при разном быстродействии наблюдателя со сбалансированной моделью. В большинстве случаев для улучшения робастности наблюдателей к погрешностям редукции не требовалось большое быстродействие, зачастую даже при его незначительном увеличении

ошибки уменьшались до низкого уровня. Полученные функциональные зависимости максимальных ошибок наблюдения от быстродействия обычно монотонны. Были определены также зависимости этих ошибок от выбора измеряемого выхода ДЭМС и удаленности оцениваемой координаты в структуре ДЭМС от координаты, по которой корректируется наблюдатель: чем эти координаты дальше друг от друга, тем больше ошибки. Так, коррекция по току двигателя обычно обеспечивает лучшую оценку скорости  $\omega_1$ , чем скорости  $\omega_2$ .

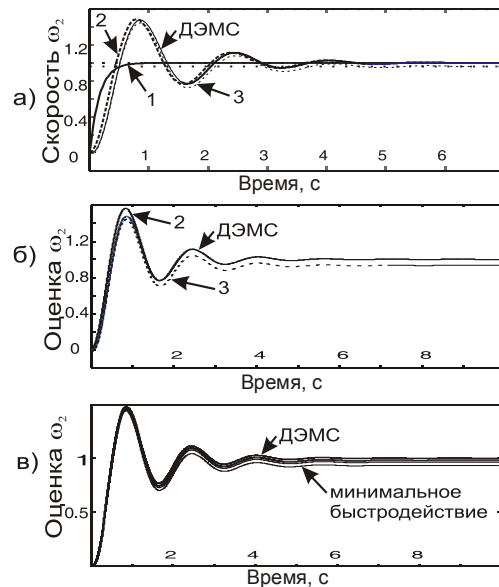


Рисунок 1 – Переходные функции для исходной модели ЭП четвертого порядка

**ВЫВОДЫ.** В целом результаты проведенного исследования позволяют считать редукцию моделей, в первую очередь, методом сбалансированного представления, эффективным приемом синтеза наблюдателей для широкого круга ЭП с упругими кинематическими связями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем. – СПб., 1998. – 257 с.

SYNTHESIS OF OBSERVERS WITH REDUCED ELECTRIC DRIVE MODELS

V. Kotlyarov, L. Zhylevskaya

National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”  
ul. Frunze, 21, Kharkov, 61002, Ukraine. E-mail: kotlyarov@kpi.kharkov.ua

Model truncation is applied to observers for electromechanical systems with elastic joints, showing that the observer order may be reduced considerably with little change to the accuracy of the observer. Three methods of model reduction were evaluated – method based on physical consideration, roots removal and balanced-truncation model realization. These methods are briefly introduced and evaluated by how well model in an observer estimates system coordinates. Performance of the observer is demonstrated by presentation of simulation results. These methods were seen to be effective and fit for use in observer synthesis.

**Key words:** full-order observer, model reduction method, balanced-truncation model realization.

REFERENCES

1. Myronovsky L.A. *Functional diagnostics of dynamic systems.* –SPb., 1998. – 257 p. [in Russian]

Статья надійшла 17.07.2012.  
Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Садовим О.В.