

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФИЛЬТРОВАННОГО БЕЛОГО ШУМА КАК ВХОДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

П.Д. Тяпкина

tyapkinapd@student.bmstu.ru

SPIN-код: 9137-9050

А.Л. Масленников

amas@bmstu.ru

SPIN-код: 7087-6303

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Идентификация биомеханических систем (например, модели элемента двигательной системы человека) сопряжена с рядом сложностей, связанных с физиологией. Одна из основных сложностей заключается в подборе достаточно информативного входного сигнала. Входным сигналом (задаваемой траекторией движения) может являться фильтрованный белый шум, однако качество идентификации при использовании такого сигнала низкое. В работе предложены два подхода к повышению качества идентификации в данной задаче: первый заключается в идентификации на ограниченном диапазоне частот, а второй — в использовании фильтра Чебышева второго типа как формирующего фильтра.

Ключевые слова

Идентификация систем, качество параметрической идентификации, биомеханические системы, формирующие фильтры, подбор информативного сигнала

Поступила в редакцию 20.11.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Высокое качество параметрической идентификации динамической системы в частотной области может быть обеспечено, когда входной сигнал по своим характеристикам близок к белому шуму. Однако такой входной сигнал не всегда пригоден для проведения практического эксперимента. В частности, это проявляется при исследовании шейного отдела позвоночника, модель которого представлена в [1–3], поскольку человек не может повторить движением головы задаваемый на экране входной сигнал (траекторию) в виде белого шума. Другими словами, ввиду физиологических особенностей шейный отдел позвоночника функционирует лишь в ограниченном диапазоне частот [4], что несколько усложняет задачу параметрической идентификации в частотной области. Фильтрованный белый шум может быть использован в качестве альтернативы белому шуму, однако качество идентификации при этом неудовлетворительное, как показано в работе [5].

Методы параметрической идентификации используются для определения оценки $\hat{\theta}$ параметров исследуемой модели, составляющих вектора θ [6, 7]. Параметрическая идентификация в частотной области заключается в предвари-

тельной оценке частотной характеристики системы $\hat{G}(\omega)$ по экспериментальным данным с последующим решением оптимизационной задачи поиска оценки $\hat{\Theta}$ следующего вида:

$$\hat{\Theta} = \underset{\Theta \in \Theta}{\operatorname{argmin}} G(\omega, \Theta) - \hat{G}(\omega).$$

Предварительная оценка $\hat{G}(\omega)$ может быть получена с помощью методов SPA (spectral analysis) и SPAFDR (spectral analysis with frequency-dependent resolution).

Для оценки качества параметрической идентификации наиболее часто используют два критерия [7–10], а именно попадание в модель ε_1 и попадание в параметры ε_2 :

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{y(t) - y(t, \Theta)}{y(t) - \frac{1}{N} \sum_i^N y_i(t)}; \quad \varepsilon_2 = \operatorname{cov}(\hat{\Theta}^k) = P_{\Theta}.$$

Наилучшее попадание в модель характеризуется стремлением к нулю отклонения выхода идентифицируемой системы $y(t, \Theta)$ относительно полученного экспериментально выхода $y(t)$ системы. Точность попадания в параметры оценивается как норма ковариационной матрицы $\|P_{\Theta}\|$ ошибок оценок, что следует из неравенства Крамера — Рао.

На основе этих двух критериев в работе [5] проводили сравнение трех входных сигналов для параметрической идентификации во временной и в частотной областях биомеханической системы на примере шейного отдела позвоночника. Результаты показали, что фильтрованный белый шум (формирующий фильтр — фильтр Баттерворта пятого порядка с частотой среза 5 Гц), используемый в качестве входного сигнала, позволяет получить качественные оценки при параметрической идентификации во временной области, в то время как при идентификации в частотной области попадание в параметры неудовлетворительное, что не позволяет считать получаемые оценки истинными. Отметим, что частота 5 Гц выбрана как не превышающая физиологически возможную частоту движения шейного отдела позвоночника в вертикальной плоскости [4]. Полученные в [5] числовые значения критериев ε_1 и ε_2 (в частотной области) при входных воздействиях в виде белого шума и фильтрованного белого шума показаны на рис. 1.

Неудовлетворительное попадание в параметры в данном случае обусловлено подавлением формирующим фильтром Баттерворта пятого порядка существенной части спектральной составляющей входного сигнала (рис. 2). Следовательно, система не получает достаточного возбуждения на существенном диапазоне частот и качество идентификации падает.

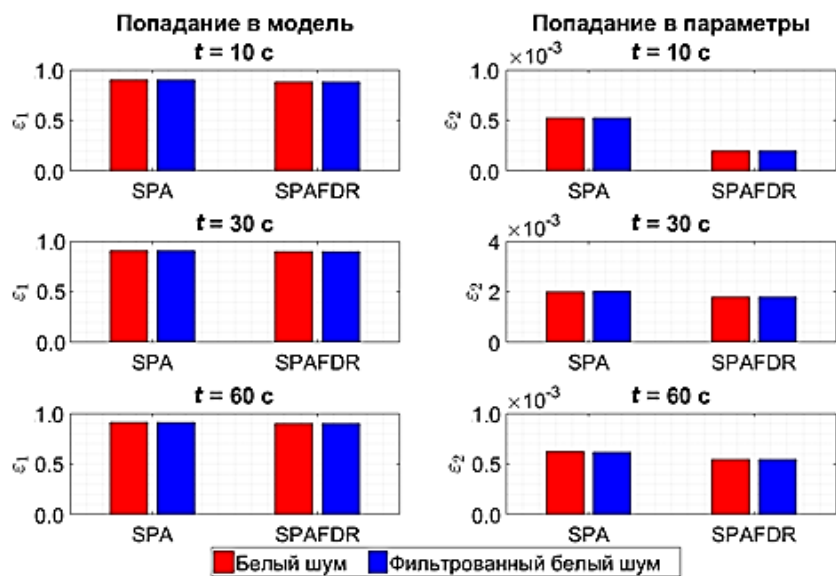


Рис. 1. Показатели качества параметрической идентификации в частотной области

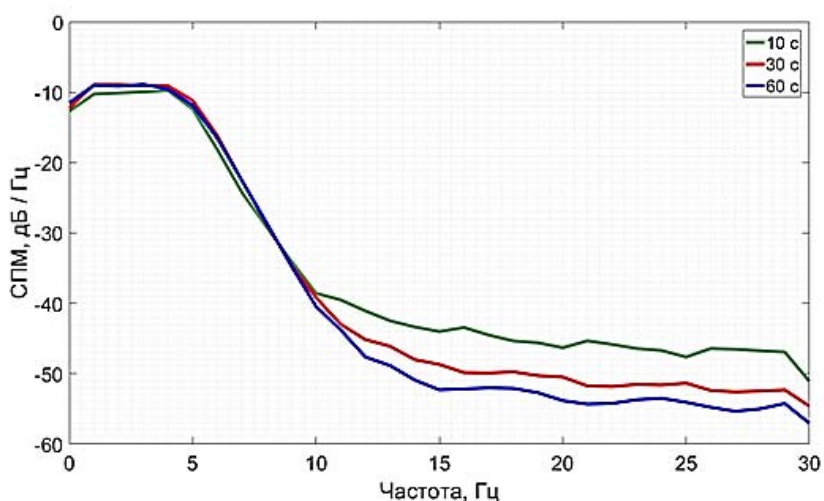


Рис. 2. Спектральная плотность мощности фильтрованного белого шума

Тем не менее фильтрованный белый шум по своей форме является хорошим сигналом для проведения эксперимента, поэтому в данной работе рассмотрены два подхода к повышению качества идентификации при его использовании. Первый заключается в том, что идентификация проводится на ограниченном диапазоне частот. Во втором подходе при формировании входного сигнала применяется формирующий фильтр с меньшим коэффициентом подавления на высоких частотах. Отметим, что традиционный подход декорреляции (prewhitening, whitening filter) входных и выходных сигналов с последующей идентификацией в данном случае неприменим, что обусловлено использовани-

ем в текущей задаче некорреляционных методов идентификации, ввиду чего декоррелирование сигналов не принесет пользы.

Ограничение диапазона частот. Данный подход заключается в том, что идентификация в частотной области проводится только в области частот до заданной частоты $F_{\text{обр}}$, что также относится и к предварительной оценке частотной характеристики $\hat{G}(\omega)$. Теоретически выбор $F_{\text{обр}}$ обусловлен частотой среза формирующего фильтра. Например, для использовавшегося ранее фильтра Баттерворта пятого порядка $F_{\text{обр}}$ должна составлять 5 Гц.

Для подтверждения этого предположения проведем серию тестов по параметрической идентификации модели шейного отдела позвоночника в частотной области при изменении частоты $F_{\text{обр}}$ в диапазоне 2,5...7,5 Гц с шагом 0,25 Гц. Частоту формирующего фильтра оставим равной 5 Гц. Результаты тестов подтверждают предположение о выборе $F_{\text{обр}}$: значение ε_2 минимально при $F_{\text{обр}} = 5$ Гц, что проиллюстрировано на рис. 3, где по оси ординат показан ε — модуль изменения ε_2 (относительно значения ε_2 при $F_{\text{обр}} = 5$ Гц) в зависимости от $F_{\text{обр}}$ в диапазоне 2,5...7,5 Гц.

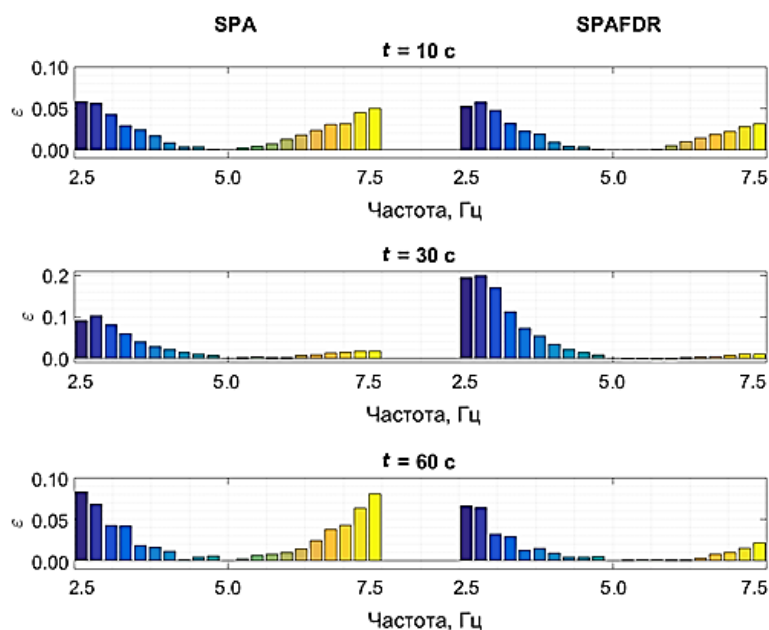


Рис. 3. Попадание в параметры в зависимости от $F_{\text{обр}}$

Таким образом, наиболее оптимальным значением частоты $F_{\text{обр}}$ является частота среза формирующего фильтра (в данном случае 5 Гц). Значения критерия попадания в параметры ε_2 , полученные при идентификации модели шейного отдела позвоночника в ограниченном диапазоне частот, в сравнении с подходом без такого ограничения представлены в табл. 1.

**Критерий попадания в параметры ε_2 для сравнения идентификации
с ограничением и без ограничения диапазона частот**

Сигнал	SPA			SPAFDR		
	10 с	30 с	60 с	10 с	30 с	60 с
Фильтрованный белый шум без ограничения диапазона частот	0,0100	0,0144	0,1055	0,0025	0,0079	0,1064
Фильтрованный белый шум при $F_{обр} = 5$ Гц	0,0051	0,0018	0,0006	0,0018	0,0015	0,0005

При сравнении соответствующих значений видно, что попадание в параметры при идентификации в ограниченном диапазоне частот лучше, чем при подходе без ограничения (соответствующие значения ε_2 меньше). Таким образом, можно улучшить качество идентификации с ограничением диапазона частот до частоты $F_{обр}$, близкой к частоте формирующего фильтра.

Использование альтернативного формирующего фильтра. Второй подход заключается в выборе формирующего фильтра, при котором спектральная плотность мощности получаемого сигнала на высоких частотах подавляется меньше. Фильтр Баттерворта значительно подавляет сигнал на высоких частотах (рис. 2). В качестве альтернативы можно использовать фильтр Чебышева второго типа, у которого полоса пропускания не подвержена искажениям, а подавление высоких частот регулируется параметром фильтра — коэффициентом подавления R_s полосы подавления. Спектральная плотность мощности фильтрованного белого шума, полученного с помощью фильтра Баттерворта (пятый порядок, частота среза 5 Гц) и фильтра Чебышева второго типа (пятый порядок, частота среза 5 Гц) для значений $R_s = \{20, 30, 40\}$ дБ, представлена на рис. 4.

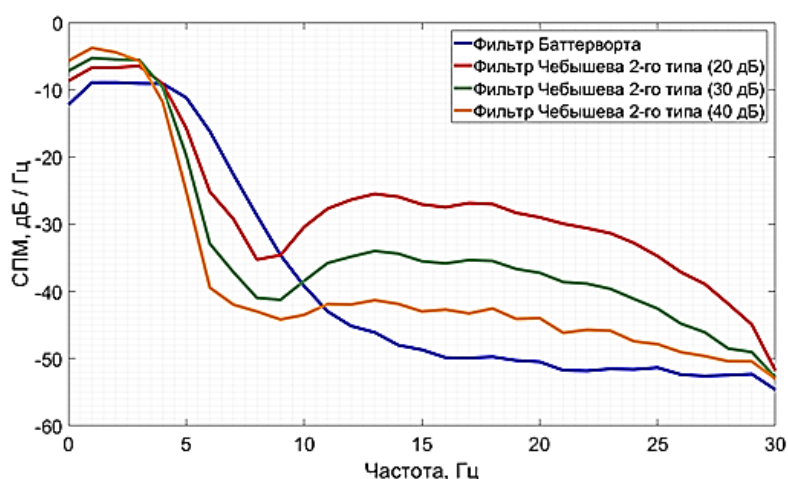


Рис. 4. Спектральные плотности мощности сигналов, полученных с помощью формирующих фильтров Баттерворта и Чебышева второго типа, для длительности 30 с

Сигнал, полученный с помощью фильтра Чебышева второго типа, можно использовать в качестве входного сигнала для идентификации рассматриваемой биомеханической системы, поскольку подобную траекторию (форму сигнала) человек сможет повторить.

Определим оптимальное значение R_s из серии тестов, в рамках которой вычислим значения критериев ε_1 и ε_2 при $R_s = \{20, 30, 40\}$ дБ (рис. 5).

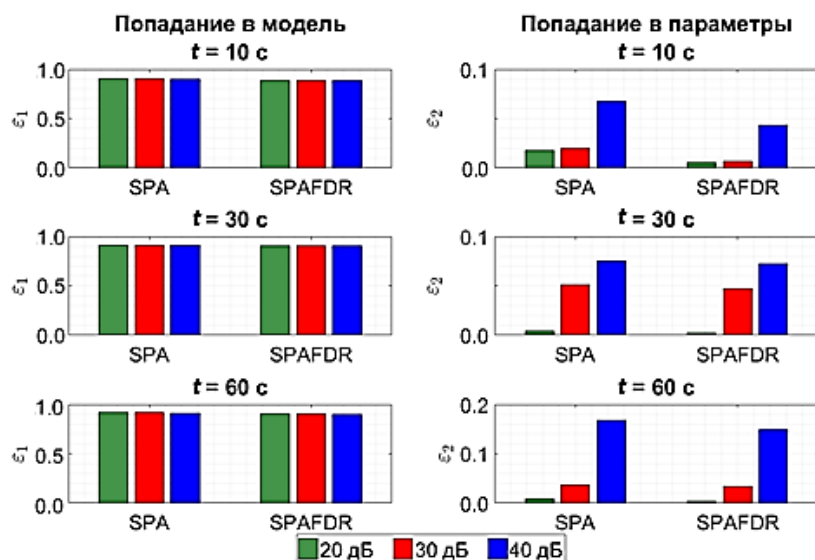


Рис. 5. Показатели качества параметрической идентификации при входном воздействии, полученном с помощью фильтра Чебышева второго типа

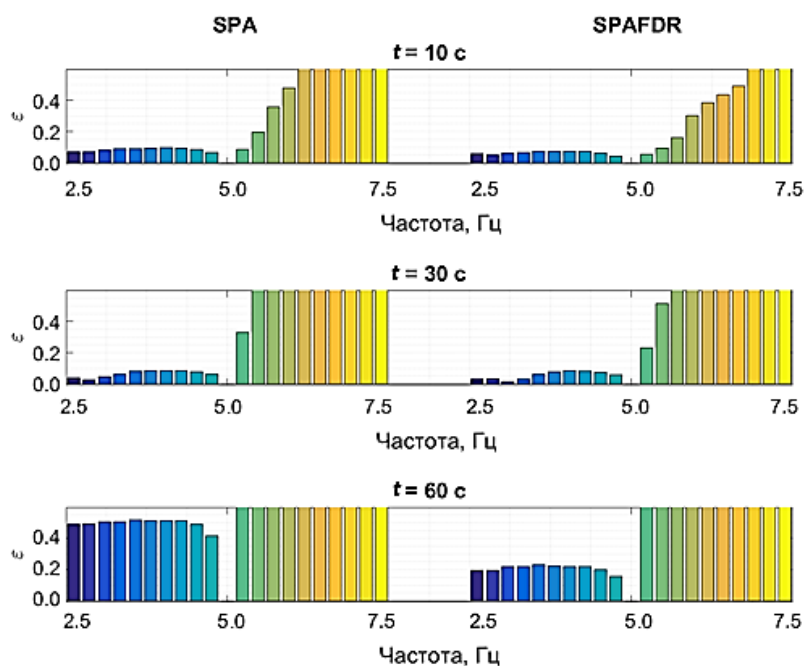
Фильтр Чебышева второго типа с $R_s = 40$ дБ по своим характеристикам близок к исходному фильтру Баттерворта. Как следствие, полученная оценка попадания в параметры является неудовлетворительной. При уменьшении R_s попадание в параметры улучшается, однако в этом случае форма сигнала на выходе фильтра приближается к белому шуму, что затрудняет использование получаемого сигнала при идентификации в частотной области рассматриваемой биомеханической системы. Соответственно, выбор R_s рекомендуется осуществлять экспериментально в окрестности значения 30 дБ.

Результаты сравнения значений критерия попадания в параметры ε_2 для идентификации при использовании рассмотренного подхода приведены в табл. 2.

В табл. 2 отчетливо заметна тенденция к снижению значения критерия попадания в параметры ε_2 (повышение качества идентификации) при увеличении длительности эксперимента и использовании формирующего фильтра Баттерворта и Чебышева с различными параметрами. Кроме того, применение идентификации в частотной области с ограничением диапазона частот для формирующего фильтра Чебышева второго типа с $R_s = 30$ дБ имеет тот же положительный эффект, как и при формирующем фильтре Баттерворта (рис. 6).

Критерий попадания в параметры ε_2 для сравнения использования альтернативного формирующего фильтра

Сигнал	SPA			SPAFDR		
	10 с	30 с	60 с	10 с	30 с	60 с
Фильтрованный белый шум без ограничения диапазона частот (фильтр Баттерворта)	0,0100	0,0144	0,1055	0,0025	0,0079	0,1064
Фильтрованный белый шум (фильтр Чебышева второго типа с $R_s = 30$ дБ)	0,0198	0,0510	0,0365	0,0067	0,0477	0,0348
Фильтрованный белый шум при $F_{обр} = 5$ Гц (фильтр Чебышева второго типа с $R_s = 30$ дБ)	0,0036	0,0014	0,0008	0,0013	0,0012	0,0005

Рис. 6. Попадание в параметры ε в зависимости от $F_{обр}$

Сравнение рассмотренных подходов проиллюстрировано на рис. 7.

Выводы. В общем случае входной сигнал, по своим параметрам близкий к характеристикам белого шума, является наиболее информативным при решении задачи идентификации, в том числе и в частотной области. Однако для идентификации динамики биомеханических систем использовать подобный сигнал не представляется возможным. В качестве альтернативного входного сигнала можно применять фильтрованный белый шум. В то же время, как отмечено в [5], в этом случае не удастся достичь удовлетворительного качества идентификации (попадания в параметры).

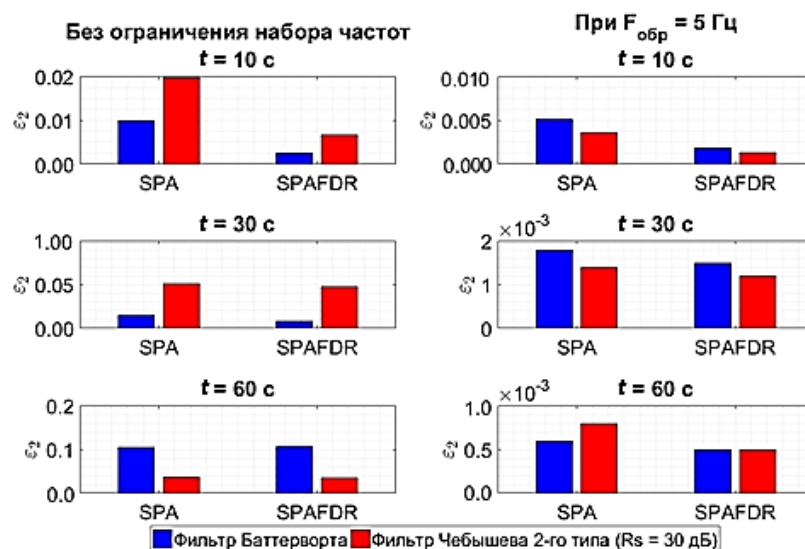


Рис. 7. Попадание в параметры в зависимости от применяемого подхода

В данной работе рассмотрены два подхода, с помощью которых можно улучшить попадание в параметры при использовании фильтрованного белого шума в качестве входного сигнала при идентификации в частотной области. Первый подход заключается в идентификации в частотной области на ограниченном диапазоне частот, второй — в применении фильтра Чебышева второго типа в качестве формирующего фильтра. Комбинированное использование этих подходов позволяет дополнительно повысить качество идентификации.

Ограничение диапазона частот при идентификации улучшает попадание в параметры особенно при увеличении длительности входного сигнала, что проиллюстрировано данными из табл. 1 и 2 (при использовании фильтра Чебышева второго типа). По сравнению с использованием фильтра Баттерворта применение фильтра Чебышева второго типа позволяет получить входной сигнал, с помощью которого можно улучшить попадание в параметры. Отметим, что выбор коэффициента подавления R_s полосы подавления имеет важное значение. По результатам исследования рекомендуемое значение R_s составляет 30 дБ.

Литература

- [1] Maslennikov A.L. *Robust Analysis and Control Design of the Head-Neck System (Master's thesis)*. Michigan State University, 2013. p. 42.
URL: <https://d.lib.msu.edu/etd/2194> (дата обращения 12.09.2017).
- [2] Peng G.C., Peterson B.W., Hain T. A dynamical model for reflex activated head movements in the horizontal plane. *Biological Cybernetics*, 1996, vol. 75, no. 4, pp. 309–319.
- [3] Peterson B.W., Choi H., Hain T., Keshner E., Peng G.C.Y. Dynamic and Kinematic Strategies for Head Movement Control. *The Vestibular Labyrinth in Health and Disease*, October 2001, vol. 942, pp. 381–393.

- [4] Keshner E.A. Modulating active stiffness affects head stabilizing strategies in young and elderly adults during trunk rotations in the vertical plane. *Gait and Posture*, 2000, vol. 11, no. 1, pp. 1–11.
- [5] Тяпкина П.Д., Масленников А.Л. Сравнение входных сигналов для параметрической идентификации во временной и в частотной областях биомеханических систем. *Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.* 2017, вып. 7. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/859770.html> (дата обращения 10.09.2017).
- [6] Forssell U., Ljung L. Closed-loop Identification. Revisited. *Automatica*, July 1999, vol. 35, no. 7, pp. 1215–1241.
- [7] Ljung L. *System Identification — Theory for the User*. Prentice-Hall, 1999, p. 609.
- [8] Soderström T. *System identification*. Prentice-Hall, 1988, p. 613.
- [9] Martensson J., Everitt N., Hjalmarsson H. Covariance analysis in SISO linear systems identification. *Automatica*, March 2017, vol. 77, no. 3, pp. 82–92.
- [10] Ljung L. Asymptotic Variance Expressions for Identified Black-Box Transfer Function Models. *IEEE Transactions on automatic control*, September 1985, vol. AC-30, no. 9, pp. 834–844.

Тяпкина Полина Дмитриевна — студент кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Масленников Андрей Леонидович — аспирант кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Задорожная Наталья Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

INCREASING ACCURACY OF IDENTIFICATION OF BIOMECHANICAL SYSTEMS MODELS WITH THE USAGE OF FILTERED WHITE NOISE AS THE INPUT SIGNAL

P.D. Tyapkina

tyapkinapd@student.bmstu.ru

SPIN-код: 9137-9050

A.L. Maslennikov

amas@bmstu.ru

SPIN-код: 7087-6303

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Identification of biomechanical systems, for instance, the neuromuscular system model or its parts, has some difficulties related to physiology. One of the problems is to design informative enough input signal. Theoretically, one of the most informative input signal is white noise, but it is hard to follow for human. Filtered white noise is the alternative, but the accuracy of identification is typically low in this case. In this paper two approaches for improving the accuracy of identification in frequency domain with filtered white noise as input signal. In the first one, the identification is performed in the limited frequency range and the second one utilizes the Chebyshev Type II filter.

Keywords

System identification, accuracy of parametric identification, biomechanical systems, filters, input signal design, informative signals

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Maslennikov A.L. Robust analysis and control design of the head-neck system. Master's thesis. Michigan State University, 2013, p. 42. Available at: <https://d.lib.msu.edu/etd/2194> (accessed 17.08.2017).
- [2] Peng G.C., Peterson B.W., Hain T. A dynamical model for reflex activated head movements in the horizontal plane. *Biological Cybernetics*, 1996, 75(4), pp. 309–319.
- [3] Peterson B.W., Choi H., Hain T., Keshner E., Peng G.C.Y. Dynamic and kinematic strategies for head movement control. *The Vestibular Labyrinth in Health and Disease*, October 2001, vol. 942, pp. 381–393.
- [4] Keshner E.A. Modulating active stiffness affects head stabilizing strategies in young and elderly adults during trunk rotations in the vertical plane. *Gait and Posture*, 2000, vol. 11(1), pp. 1–11.
- [5] Tyapkina P.D., Maslennikov A.L. Sravnenie vhodnykh signalov dlya parametriceskoy identifikatsii vo vremennoy i v chastotnoy oblasti biomechanicheskikh sistem [Comparison of input signals for parametric identification of biomechanical systems in time and frequency domain]. *Molodezhnyy nauchno-tehnicheskiy vestnik. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. zhurn* [Youth herald of the Bauman Moscow State Technical University], 2017, vol. 7. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/859770.html> (in Russ.).
- [6] Forssell U., Ljung L. Closed-loop identification. Revisited. *Automatica*, July 1999, vol. 35(7), pp. 1215–1241.

- [7] Ljung L. System identification. Theory for the user. Prentice-Hall, 1999. 609 p.
- [8] Soderstrfm T. System identification. Prentice-Hall, 1988. 613 p.
- [9] Martensson J., Everitt N., Hjalmarsson H. Covariance analysis in SISO linear systems identification. *Automatica*, March 2017, vol. 77(3), pp. 82–92.
- [10] Ljung L. Asymptotic Variance expressions for identified black-box transfer function models. *IEEE Transactions on automatic control*, September 1985, vol. AC-30(9), pp. 834–844.

Тяпкина P.D. — student, Department of Automated Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Maslennikov A.L. — post-graduate student, Department of Automated Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Zadorozhnaya N.M., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Automated Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.