

УДК 681.5.015.8

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-116-125

Особенности идентификации динамических объектов импульсными тестирующими последовательностями

О.С. Колосов, А.Д. Пронин

Проведен анализ особенностей процесса идентификации линейных динамических объектов с использованием тестирующей последовательности прямоугольных импульсов. Предполагается, что корни характеристического уравнения идентифицируемого объекта действительные и отрицательные. Проанализирована процедура оценки дискретных точек амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) линейных динамических объектов с использованием амплитудного спектра одиночного импульса из периодической импульсной последовательности на периоде следования и амплитудного спектра сигнала на выходе идентифицируемого объекта. Определены источники погрешностей в оценках точек АЧХ динамического объекта. Найдены условия, учитывающие инерционность объекта и позволяющие оценить промежуточные точки АЧХ за счет искусственного удлинения периода наблюдаемого сигнала нулевыми значениями. Представлены достоинства и недостатки предлагаемого способа идентификации линейных объектов.

Полученные результаты позволяют оценить изменения положений точек АЧХ объекта в процессе его эксплуатации в системах с адаптивными регуляторами и системах диагностики. В адаптивных регуляторах подача одного тестирующего импульса на объект может заменить генерацию нескольких гармоник с определенными частотами. Этот прием позволяет изучить положение нескольких контрольных точек АЧХ и использовать эту информацию для диагностики состояния объекта и подстройки параметров в адаптивных регуляторах.

Ключевые слова: последовательность прямоугольных тестирующих импульсов, амплитудно-частотная характеристика, идентификация, линейный динамический объект.

Для цитирования: Колосов О.С., Пронин А.Д. Особенности идентификации динамических объектов импульсными тестирующими последовательностями // Вестник МЭИ. 2018. № 3. С. 116—125. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-116-125.

Specific Features Pertinent to Identification of Dynamic Objects Using Pulse Testing Sequences

O.S. Kolosov, A.D. Pronin

The specific features pertinent to identifying linear dynamic objects by using a testing sequence of rectangular pulses are analyzed. It is assumed that the roots of the characteristic equation of the identified object lie in the real negative quadrant of the complex plane. The article analyzes a procedure for estimating the discrete points of the amplitude-frequency responses (AFR) of linear dynamic objects using the amplitude spectrum of a single pulse from a periodic pulse sequence on the pulse period and amplitude spectrum of the signal at the identified object output. The sources of errors in the estimates of the dynamic object's AFR points are determined. The conditions that take into consideration the object inertia and make it possible to estimate the AFR intermediate points through artificially elongating the observed signal's period by zero values are found. The advantages and disadvantages of the proposed method for identifying linear objects are outlined.

The obtained results make it possible to estimate changes in the positions of the object's AFR points during its operation in systems with adaptive controllers and in diagnostic systems. In adaptive controllers, the application of one test pulse to an object can replace the generation of several harmonics with certain frequencies. This technique makes it possible to study the position of several check points of the AFR and use this information to diagnose the state of the object and to adjust the parameters in adaptive controllers.

Key words: sequence of rectangular testing pulses, amplitude-frequency response, identification, linear dynamic object.

For citation: Kolosov O.S., Pronin A.D. Specific Features Pertinent to Identification of Dynamic Objects Using Pulse Testing Sequences. MPEI Vestnik. 2018;3:116—125. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-116-125.

Введение

Вопросы оценки динамических свойств объектов с использованием импульсных тестирующих последовательностей практически не нашли отражения ни в теории идентификации, ни на периодически проводимых симпозиумах [1], ни в статьях и монографиях [2, 3]. Причиной этого является достаточно хорошо разработанная теория и методики проведения активных экспериментов с использованием ступенчатых сигналов (скачков), гармонических воздействий и генераторов псевдослучайных сигналов. В последние годы интенсивно развиваются методы идентификации на основе модулирующих функций [4], но они чаще всего ориентированы на подачу на вход объекта ступенчатого сигнала. В силу того, что каждый испытуемый объект имеет свои индивидуальные особенности, связанные с его режимами работы, ни один из названных видов тестирующих сигналов не может считаться универсальным. В ряде практических случаев идентификация импульсными сигналами может быть предпочтительнее.

В современных промышленных адаптивных регуляторах чаще всего используется метод идентификации [5 — 7], связанный с генерацией определенной последовательности или суммы тестирующих гармонических сигналов. Длительность эксперимента при этом оказывается зачастую недопустимо большой из-за необходимости ожидания окончания переходных процессов. При этом такое дополнительное «зашумление» основного управляющего сигнала приводит к нежелательному снижению качества управления. Применение ступенчатых и псевдослучайных сигналов в подобных регуляторах вообще избегается. Именно поэтому импульсные тестирующие сигналы могут оказаться достаточно эффективными в адаптивных системах. Их применение существенно сократит время проведения идентификационного эксперимента путем учета известного спектра входного сигнала и соответствующего выбора амплитуды, длительности импульса и надлежащего выбора общего времени наблюдения за реакцией объекта.

Другим примером применения импульсных тестирующих сигналов является офтальмология, когда для диагностики патологий сетчатки глаза на нее воздействуют сериями коротких световых, практически прямоугольных импульсов на определенных стандартных частотах их следования. Отклик сетчатки в виде изменения ее биопотенциала (электроретинограмма (ЭРГ) [8, 9]) раскладывается в ряд Фурье на периоде следования импульсов и по виду получаемого спектра определяется вид патологии [10]. Однако в таком спектре, помимо свойств сетчатки как динамического объекта отражаются характеристики тестирующего сигнала и регистрирующего прибора, которые следует учитывать при диагностике [10].

Как правило, объекты, подвергаемые тестированию, являются нелинейными и, часто, с изменяющи-

мися во времени параметрами. Идентифицируемые параметры передаточной функции такого объекта соответствуют текущим условиям его эксплуатации и для этих условий информативные параметры могут извлекаться из его амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) как линейного объекта в окрестности текущего режима. Теория управления накопила достаточное число приемов идентификации нелинейных объектов в окрестностях точек их рабочих режимов, где с успехом используются приемы идентификации линейных объектов [12, 13]. Именно поэтому настоящая работа посвящена обоснованию возможности оценки частотных свойств линейных динамических объектов с использованием импульсного тестирующего воздействия из состава импульсной последовательности. При этом влияние шумовой составляющей в регистрируемом выходном сигнале объекта на результаты идентификации не рассматривается.

В такой постановке использование импульсных сигналов на ограниченном интервале наблюдения для идентификации требует ответа на основной вопрос: как зависит точность оценки точек амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристик линейного объекта, если используются модули и фазы соответствующих гармоник в разложениях в ряд Фурье выходного сигнала объекта и входного импульсного сигнала.

Проанализированы особенности оценки дискретных точек АЧХ линейных динамических объектов с использованием амплитудного спектра одиночного входного импульса из периодической импульсной последовательности и амплитудного спектра сигнала на выходе идентифицируемого объекта в двух вариантах.

Вариант 1 эквивалентен случаю анализа реакции объекта на действие первого импульса из импульсной последовательности с периодом следования импульсов, равным интервалу наблюдения. Проведена оценка точек АЧХ объекта от действия одиночного тестирующего импульса на ограниченном интервале наблюдения и нулевых начальных условиях на выходе объекта.

Вариант 2. Выполнена оценка точек АЧХ объекта от действия одиночного тестирующего импульса с номером m с учетом общей реакции объекта на предыдущие импульсы на наблюдаемом периоде.

Предполагается, что передаточная функция объекта, описывающая текущий режим эксплуатации, представляет собой отношение двух полиномов. Порядок полинома числителя не превышает порядка знаменателя. Корни полиномов знаменателя и числителя действительные и отрицательные.

Амплитудный спектр входного импульсного тестирующего воздействия

Для получения спектров входного и выходного сигналов объекта используется разложение функции в ряд Фурье [14], согласно которому периодическую функ-

цию $f(t)$, удовлетворяющую условиям Дирихле, можно представить в виде ряда

$$f(t) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \cos n\omega t), \quad (1)$$

где a_n , b_n , b_0 — коэффициенты ряда Фурье, определяемые из соотношений

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt; \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt; \quad b_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt. \end{aligned} \quad (2)$$

Амплитуды гармоник ряда выглядят как

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}. \quad (3)$$

Для оценки дискретных значений АЧХ объекта поделим значения амплитуд гармоник выходного сигнала на значения амплитуд соответствующих гармоник (с теми же номерами) входного сигнала, в соответствии с (3).

Форма входного тестирующего сигнала $X(t)$ периодической последовательности импульсов представлена на рис. 1. Спектр подобного периодического сигнала вычисляется путем разложения его в ряд Фурье на временном интервале, равном одному периоду следования импульсов T_n . Аналитическая форма записи для вычисления гармоник спектра с номерами $n = 1, 2, 3, \dots$ имеет вид [14]:

$$a_n(n\omega_n) = 2A \frac{\left| \sin \frac{n\omega_n \tau}{2} \right|}{\frac{n\omega_n T_n}{2}}, \quad \text{где } \omega_n = 2\pi f_n = 2\pi \frac{1}{T_n}. \quad (4)$$

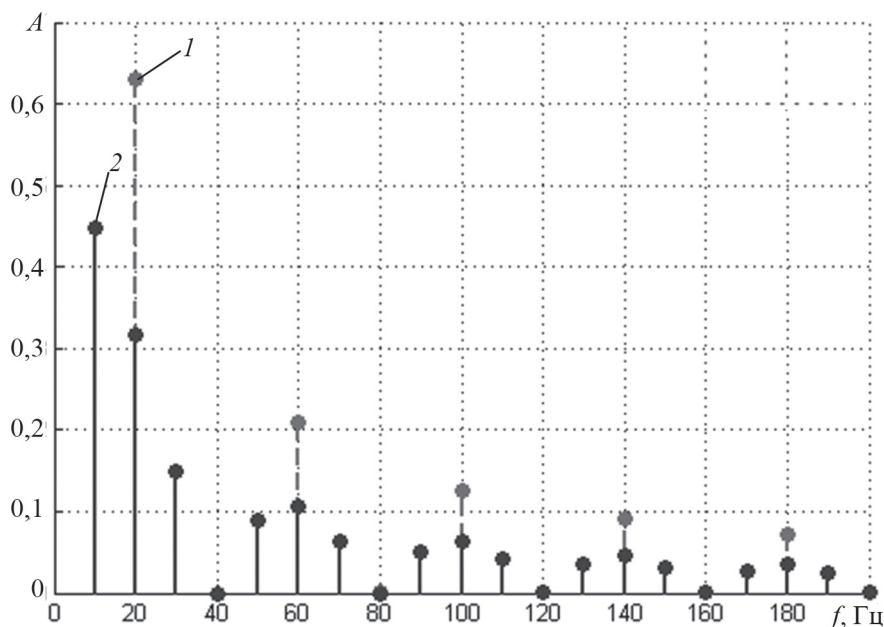


Рис. 2. Спектры входных сигналов $X(f)$ с частотами следования импульсов f_n 10 (2) и 20 (1) Гц и длительностью импульса $\tau = 0,025$ с

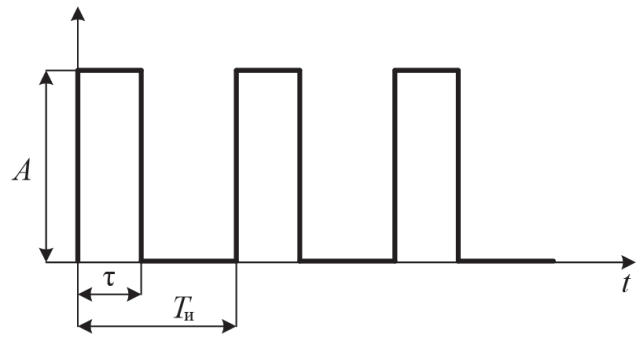


Рис. 1. Форма входного тестирующего сигнала $X(t)$:

A — амплитуда; τ — длительность импульса; T_n — период следования импульсов

На рис. 2 показан вид спектров входных сигналов $X(f)$ с частотами следования импульсов f_n 10 и 20 Гц и длительностью импульса $\tau = 0,025$ с.

Отметим ряд ключевых особенностей представленных спектров.

Амплитуды гармоник, соответствующих частотам, кратным обратному значению длительности импульса τ , равны нулю, соответственно, оценка точек АЧХ объекта в окрестности частот 40, 80, 120 Гц и т.д. затруднена при наличии ненулевых гармоник в спектре выходного сигнала (чаще всего из-за шумовой составляющей).

Гармоник в ограниченном частотном интервале для сигнала с частотой следования импульсов в 10 Гц в два раза больше, чем для сигнала с частотой следования импульсов в 20 Гц.

Амплитуды гармоник в спектрах пропорциональны частоте следования импульсов. В рассматриваемом случае амплитуда первой гармоники входного сигнала

при частоте следования импульсов 20 Гц в два раза больше второй гармоники входного сигнала при частоте следования импульсов 10 Гц.

Амплитудный спектр выходного сигнала линейного объекта

Рассмотрим линейный объект, с передаточной функцией в виде отношений двух алгебраических полиномов. Порядок полинома числителя не превышает порядка полинома знаменателя, Корни полиномов знаменателя и числителя — действительные и отрицательные. Согласно теории вычетов, структуру подобного объекта можно представить параллельно включенными аperiodическими (инерционными) и реальными дифференцирующими звеньями первого порядка, а число таких звеньев будет равно числу корней знаменателя передаточной функции объекта. В связи с этим проанализируем спектры реакции этих двух типовых звеньев на тестирующий импульс и оценим возможность получения точек их АЧХ путем деления амплитуд гармоник (с соответствующими номерами) выходного сигнала на входной. Проведем экспериментальную идентификацию объектов и сравним полученные результаты с теоретическими.

Отметим, что в зависимости от интервала частот, на котором рассматривается АЧХ, и от частоты следования входных импульсов число точек АЧХ может быть весьма мало. Так, при подаче импульсов с частотой 20 Гц при рассматриваемой области частот АЧХ от 0 до 100 Гц таких точек будет всего 5, что недостаточно. Промежуточные точки АЧХ можно получить путем искусственного увеличения периода следования импульсов нулевыми значениями [6, 9]. Искусственное удлинение периода разложения наблюдаемого сигнала (или «окна») нулевыми значениями применяется в радиотехнике для определения промежуточных гармоник спектра исследуемого сигнала [15, 16]. Принципиальным моментом для такого приема является нулевое математическое ожидание наблюдаемого сигнала. В нашем случае этого нет. Однако выручает то обстоятельство, что наблюдаемая реакция исследуемых звеньев с течением времени стремится к нулю, а входной сигнал также имеет нулевое значение после прохода тестирующего импульса. Удлинение периода исследуемого сигнала приводит к пропорциональному уменьшению амплитуд гармоник в спектре, но поскольку это уменьшение относится к спектрам входного и выходного сигналов, то это не будет отражаться на точках оцениваемых АЧХ, являющихся отношением амплитуд соответствующих гармоник [11].

Таким образом, удливив период исходного сигнала в рассматриваемом примере до 1 с, получим псевдочастоту следования импульсов 1 Гц, что после разложения в ряд Фурье и последующих преобразований даст 100 точек АЧХ при ее построении на интервале от 0 до 100 Гц.

Спектр наблюдаемого сигнала и оценка точек амплитудно-частотной характеристики аperiodического звена

Аperiodическое (инерционное) звено описывается уравнением

$$T_0 \frac{dy}{dt} + y = Kx, \quad (5)$$

где T_0 , K — постоянная времени и коэффициент передачи звена; x , y — входной и выходной сигналы.

Амплитудно-фазовая характеристика такого звена определяется амплитудно- $A(\omega)$ и фазочастотной $\varphi(\omega)$ характеристиками

$$|W(j\omega)| = A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega T_0)^2}};$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \omega T_0.$$

Реакция $f_1(t)$ аperiodического звена на одиночный тестирующий импульс при нулевых начальных условиях (вариант 1) показана на рис. 3. Наблюдаемый на рис. 3 сигнал в общем виде описывается системой уравнений

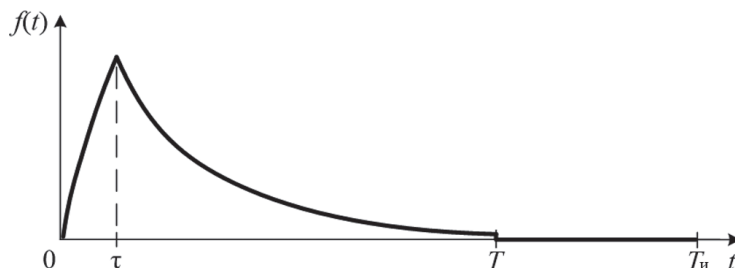


Рис. 3. Реакция аperiodического звена на одиночный тестирующий импульс:

τ — время окончания действия входного тестирующего импульса; T — время наблюдения реакции объекта (реакция на действие первого тестирующего импульса из последовательности импульсов с периодом T , обычно ограничивается моментом достижения выходным сигналом уровня СКО шумовой составляющей с нулевым математическим ожиданием); T_n — время окончания периода, искусственно удлиненного нулями с целью получения промежуточных точек спектра

$$f_1(t) = \begin{cases} AK(1 - e^{-\beta t}), & 0 \leq t \leq \tau; \\ AK(1 - e^{-\beta t}) - AK(1 - e^{-\beta(t-\tau)}), & \tau \leq t \leq T; \\ 0, & T \leq t \leq T_n, \end{cases} \quad (6)$$

где $\beta = 1/T_0$.

Во втором варианте, когда идет поиск спектра реакции объекта на периоде с номером m , система (6) должна учитывать реакцию объекта на предыдущие импульсы. С целью упрощения выкладок эта реакция рассматривается на последующих периодах. По существу такая свертка приводится к первому периоду.

$$f_m(t) = \begin{cases} f_1 + \sum_{i=2}^m AK(e^{\beta \tau} - 1)e^{-\beta \tau}, & (i-1)T \leq t \leq iT; \\ 0, & iT \leq t \leq (i-1)T + T_n. \end{cases} \quad (7)$$

Воспользовавшись (2), определим коэффициенты разложения в ряд Фурье сигнала (6) в виде (8), (9). Они помечены верхним единичным индексом (вариант 1). Для учета (7) во втором варианте предыдущие варианты дополним слагаемыми в виде сумм (коэффициенты имеют верхние индексы m).

$$a_n^1 = \frac{AK}{n\pi} \left[\int_0^{x_1} (1 - e^{-\alpha x}) \sin x dx + k \int_{x_1}^{x_2} e^{-\alpha x} \sin x dx \right] = \frac{AK}{n\pi} \left[(1 - \cos x_1) + \frac{1}{1 + \alpha^2} \times (\cos x_1 + \alpha \sin x_1 - 1 - ke^{-\alpha x_2} \cos x_2 - k\alpha e^{-\alpha x_2} \sin x_2) \right]; \quad (8)$$

$$b_n^1 = \frac{AK}{n\pi} \left[\int_0^{x_1} (1 - e^{-\alpha x}) \cos x dx + k \int_{x_1}^{x_2} e^{-\alpha x} \cos x dx \right] = \frac{AK}{n\pi} \left[\sin x_1 + \frac{1}{1 + \alpha^2} \times (\alpha \cos x_1 - \sin x_1 - \alpha + ke^{-\alpha x_2} \sin x_2 - k\alpha e^{-\alpha x_2} \cos x_2) \right]; \quad (9)$$

где n — номер гармоники; $n\omega = \Omega$; $\beta/\Omega = \alpha$; $\Omega\tau = x_1$; $\Omega T = x_2$; $k = e^{\alpha\tau} - 1$.

$$a_n^m = \frac{AK}{n\pi} \left[(1 - \cos x_1) + \frac{1}{1 + \alpha^2} \times (\cos x_1 + \alpha \sin x_1 - 1 - ke^{-\alpha x_2} \cos x_2 - k\alpha e^{-\alpha x_2} \sin x_2) \right] + \frac{AK}{n\pi} \frac{1}{1 + \alpha^2} k \sum_{i=2}^m (e^{-\alpha x_i} - e^{-\alpha x_{i+1}} (\cos x_2 + \alpha \sin x_2)); \quad (10)$$

$$b_n^m = \frac{AK}{n\pi} \left[\sin x_1 + \frac{1}{1 + \alpha^2} (\alpha \cos x_1 - \sin x_1 - \alpha + ke^{-\alpha x_2} \sin x_2 - k\alpha e^{-\alpha x_2} \cos x_2) \right] + \frac{AK}{n\pi} \frac{1}{1 + \alpha^2} k \sum_{i=2}^m (\alpha e^{-\alpha x_i} + e^{-\alpha x_{i+1}} (\sin x_2 - \alpha \cos x_2)). \quad (11)$$

Отметим, что в (8), (9) последние два слагаемых, зависящие от x_2 , при $T \rightarrow \infty$ стремятся к 0. В этом случае расчет модуля гармоник в разложении выходного сигнала (4) приводит к соотношению

$$c_n = \frac{AK}{n\pi} \frac{\alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} 2 \sin \frac{x_1}{2}, \quad (12)$$

$$\text{где } \frac{\alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (n\omega T_0)^2}}.$$

Отношения амплитуд гармоник с одинаковыми номерами выходного сигнала (6) к входному (4) дают точное теоретическое значение модуля АЧХ апериодического звена (5) на частотах, связанных однозначно с номерами гармоник (12). Аналогичный результат получается при оценке точек АЧХ и во втором варианте. Эти же выводы относятся к оценкам точек ФЧХ (5).

Теоретически при тестировании апериодического звена одиночным импульсом в обоих вариантах экспоненты выходного сигнала с увеличением времени наблюдения T стремятся к нулю, но его не достигают. Поэтому при определении точек АФХ с использованием (8) — (11) на ограниченном интервале наблюдения неизбежно появление погрешности в оценке модуля и фазы вектора АФХ на комплексной плоскости. Ее вносят последние слагаемые в (8) — (11). Вместе с тем абсолютные значения этих погрешностей зависят только от величины отношения T/T_0 , если оно больше 10, то при $\tau/T = 0,1$ для первых 40 гармоник погрешность в оценке модуля гармоник во всех вариантах не превышает 2%. Исключения составляют гармоники с номерами $n_{кр}$, подчиняющиеся равенству:

$$n_{кр} = \frac{\omega_{кр}}{\omega_1} = \frac{2\pi j}{\tau\omega_1}, \quad \text{где } j = 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

Поскольку амплитуды гармоник входного сигнала с указанными номерами равны нулю (или очень близки к нему в расчетах и экспериментах), то необходимо их исключить из расчета.

На рис. 4 представлены погрешности в оценке по сравнению с теоретическими результатами значений точек АЧХ апериодического звена для двух значений отношений T/T_0 равных 2 и 20. Постоянная времени инерционного звена $T_0 = 0,01$ с, длительность периода входного сигнала $T_n = T$ равна $T = 0,02$ с (50 Гц), либо $T = 0,2$ с (5 Гц); длительность импульса $\tau = 0,005$ с.

Представленные на рис. 4 результаты демонстрируют, что даже при $T/T_0 = 2$ погрешности оценок то-

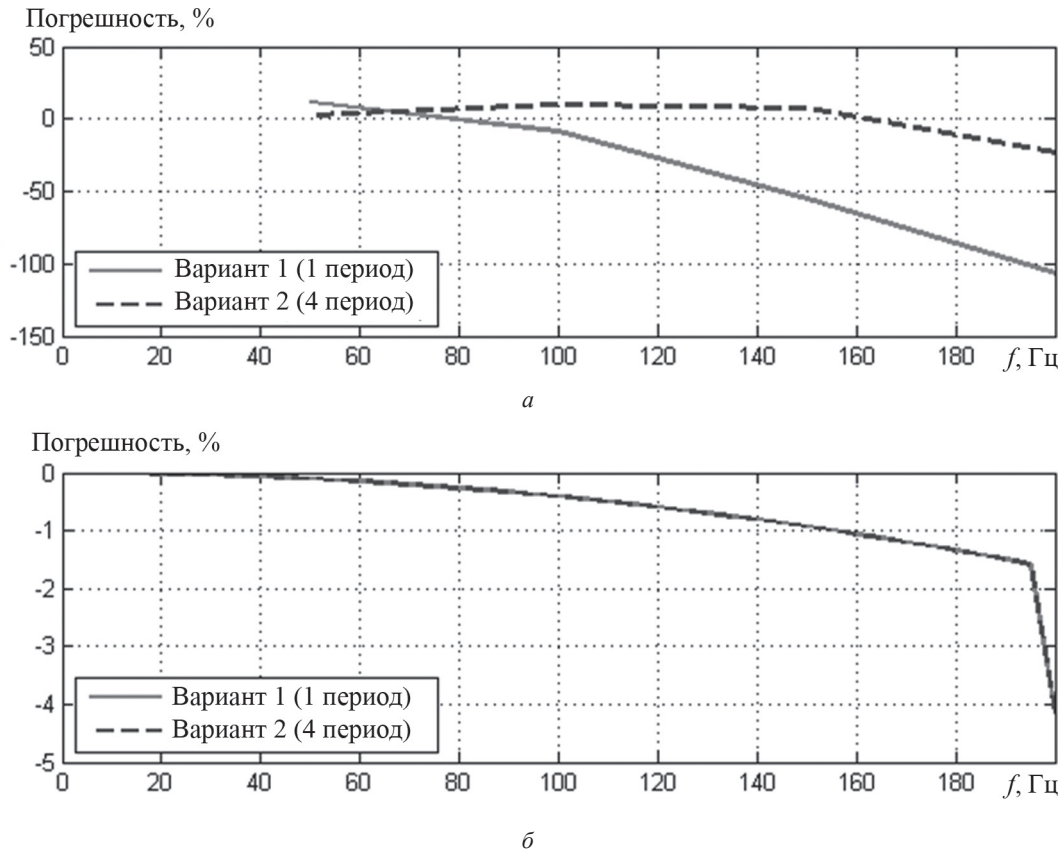


Рис. 4. Относительные погрешности оценок значений точек АЧХ аperiodического звена при $T/T_0 = 2$ (а) и 20 (б)

чек АЧХ во втором варианте относительно невелики (до 10 %), за исключением последней точки на 200 Гц. Однако первый вариант из-за нулевых начальных условий приводит к большим погрешностям. При этом точек АЧХ получается всего три. При $T/T_0 = 20$ видно, что 39 точек АЧХ оцениваются достаточно точно. Что касается крайней точки 200 Гц, которая попала на границу рассматриваемого интервала и номер этой гармоники подчиняется условию (13), то ее следует исключить из рассмотрения.

Оценка промежуточных точек амплитудно-частотной характеристики аperiodического звена путем искусственного удлинения периода следования импульсов

Вернемся к предыдущему примеру. Если рассматривать точки АЧХ звена в полосе частот до 200 Гц, то при частоте подачи импульсов в 50 Гц получим всего 3 точки, а для частоты 5 Гц таких точек будет 39. Для увеличения числа промежуточных точек спектра, а также получения дополнительных точек низкочастотной части спектра дополним периоды регистрируемых сигналов до 1 с нулями и оценим получающиеся погрешности по сравнению теоретической АЧХ. Результаты сравнения представлены на рис. 5.

Представленный на рис. 5 результат демонстрирует существенное возрастание погрешностей в оценках

промежуточных точек АЧХ при $T/T_0 = 2$, что говорит о нецелесообразности в этих условиях пользоваться приемом искусственного удлинения периода для оценки промежуточных точек АЧХ. При $T/T_0 = 20$ оценка погрешностей всех получающихся точек АЧХ снова показывает достаточно точное приближение их значений к теоретическим. Кроме этого, удалось уточнить погрешности точек вблизи 200 Гц, так как соседняя точка стала не 195, а 199 Гц.

Амплитудный спектр реального дифференцирующего звена и оценка точек его амплитудно-частотной характеристики

Реальное дифференцирующее звено описывается уравнением

$$T_0 \frac{dy}{dt} + y = K \frac{dx}{dt}. \quad (14)$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика такого звена определяется его АЧХ $A(\omega)$ и ФЧХ $\varphi(\omega)$:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \frac{K\omega}{\sqrt{1+(\omega T_0)^2}}; \quad (15)$$

$$\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctg \omega T_0.$$

Анализируя реакцию звена на тестирующий одиночный импульс, как это было сделано для аperiodи-

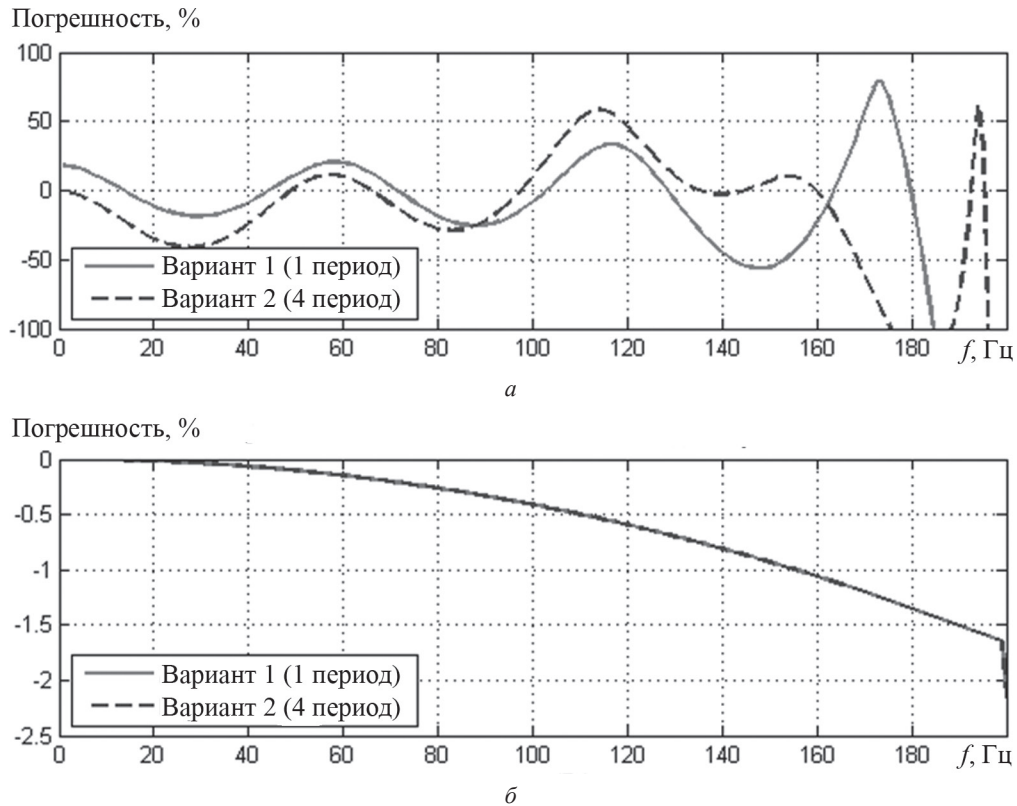


Рис. 5. Относительные погрешности оценок значений точек АЧХ апериодического звена при удлинении периода до 1 с при $T/T_0 = 2$ (а) и 20 (б)

ческого звена, и проводя ее разложение в ряд Фурье, получим составляющие a_n и b_n подобные тем, которые были получены для реакции на выходе апериодического звена:

$$a_n^1 = \frac{AK}{n\pi T_0} \left[\frac{1}{1+\alpha^2} (1 - \cos x_1 - \alpha \sin x_1 - k e^{-\alpha x_2} \cos x_2 - k \alpha e^{-\alpha x_2} \sin x_2) \right]; \quad (16)$$

$$b_n^1 = \frac{AK}{n\pi T_0} \left[\frac{1}{1+\alpha^2} (\alpha + \sin x_1 - \alpha \cos x_1 + k e^{-\alpha x_2} \sin x_2 - k \alpha e^{-\alpha x_2} \cos x_2) \right], \quad (17)$$

где n — номер гармоники; $n\omega = \Omega$; $\beta/\Omega = \alpha$; $\Omega\tau = x_1$; $\Omega\tau = x_2$; $k = 1 - e^{-\alpha\tau}$.

Интересно то, что выражения (16), (17) при $T \rightarrow \infty$ также позволяют точно оценить АФХ реального дифференцирующего звена, а при конечных значениях T погрешность определяют точно такие же слагаемые, зависящие от x_2 , что и в выражениях (8) — (11). Таким образом, все результаты, полученные для апериодического звена, оказываются справедливыми и для реального дифференцирующего звена в обоих вариантах.

Параметры тестирующего импульса и оценка точек амплитудно-частотной характеристики линейного объекта

Основными параметрами тестирующего импульса являются его амплитуда A и длительность τ . Их выби-

рают так, чтобы все процессы оставались в линейной зоне статической характеристики объекта. Кроме этого, выбор длительности τ позволяет избежать получения «неудачных» номеров гармоник для идентификации, подчиняющихся (13).

Учитывая, что линейный объект с действительными и отрицательными корнями характеристического уравнения может быть представлен в виде параллельного соединения апериодических и реальных дифференцирующих звеньев, то его реакция на одиночный тестирующий импульс содержит алгебраическую сумму реакций каждого звена структуры. При этом вносимые погрешности в оценку точек АФХ возрастают. Однако, эти погрешности в итоге целиком определяются степенью затухания переходного процесса на выходе объекта после снятия тестирующего импульса в конце интервала наблюдения, ограниченного выбранным временем T . При этом погрешности оценок точек АЧХ такого объекта также не превысят 2 %, если будет соблюдаться достаточно очевидное соотношение:

$$\frac{T}{\sum_{i=1}^n T_i} \geq 10, \quad (18)$$

где T_i — постоянные времени в знаменателях параллельно соединенных типовых апериодических и реальных дифференцирующих звеньев, реализующих исходную передаточную функцию объекта; n — число корней характеристического уравнения объекта.

Наличие транспортного запаздывания в структуре объекта можно учесть при оценке положений точек АФХ с помощью (2).

В качестве иллюстрации результата применения обсуждаемого подхода на рис. 6 представлено семейство АЧХ сетчатки глаза субъекта с нормальным зрением, построенных путем обработки ритмических электро-ретинограмм (РЭРГ) для пяти стандартных частот подачи на сетчатку световых импульсов (8,3; 10; 12; 24 и 30 Гц). Длительность импульсов составляет 0,005 с, амплитуда (яркость) вспышки гарантирует окончание переходного процесса к приходу очередного светового импульса. Это обстоятельство, как отмечалось выше, позволяет применять искусственное удлинение периода нулями для получения промежуточных точек АЧХ. Отметим, что первой «нежелательной» частотой в соответствии с (4) является 200 Гц, поэтому АЧХ сетчатки, ограниченная частотой 120 Гц, не содержит «нежелательных» гармоник.

Все АЧХ строились путем обработки РЭРГ с искусственным удлинением периода, соответствующим 1 Гц. Это позволяет проследить изменение амплитуд одноименных гармоник для разных частот подачи световых импульсов и увеличивает число промежуточ-

ных точек АЧХ. Так, для частот подачи вспышек 30 Гц АЧХ сетчатки без удлинения периода содержит всего 4 точки (на графике рис. 6 обозначены \circ), а с удлинением периода их стало 120. Отметим, что благодаря искусственному удлинению периода удается «увидеть» низкочастотную часть АЧХ, вид которой определяется наличием фильтра высоких частот регистрирующего прибора с нижней границей пропускания примерно в 1 Гц. Кроме этого, на АЧХ с частотами подачи импульсов 8,3 и 10 Гц просматриваются характеристики сетевых фильтров регистрирующего прибора, настроенные на 50 и 100 Гц.

В настоящее время, получаемые АЧХ сетчатки субъектов с разными патологиями в ходе совместных исследований физиологов МНИИ ГБ им. Гельмгольца и сотрудников НИУ «МЭИ» группируются по видам патологий и специальным образом аппроксимируются с целью получения дополнительных формализованных признаков заболеваний. Подобные признаки используются в качестве обучающих и тестирующих выборок для отработки разных вариантов построения экспертных систем диагностики патологий сетчатки глаза [17, 18].

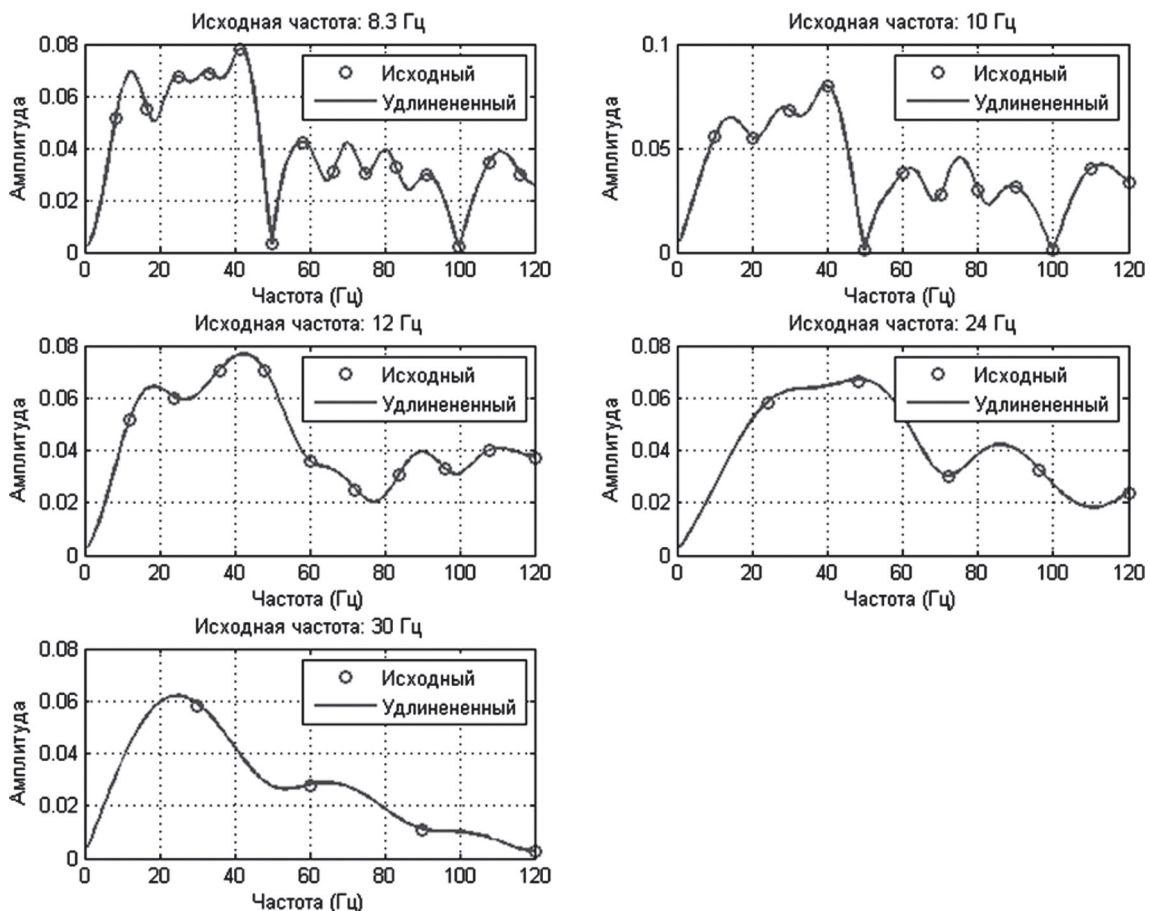


Рис. 6. Семейство АЧХ сетчатки глаза с искусственным удлинением периода следования световых импульсов (псевдо частота подачи импульсов 1 Гц)

Заключение

Проведен анализ особенностей процесса идентификации линейных динамических объектов с использованием тестирующей последовательности прямоугольных импульсов. Предложена процедура оценки дискретных точек амплитудно-частотных характеристик линейных динамических объектов с использованием амплитудного спектра одиночного импульса из периодической импульсной последовательности и амплитудного спектра сигнала на выходе идентифицируемого объекта. Определены источники погрешностей в оценках точек АЧХ динамического объекта в сравнении с теоретическими. Оценены достоинства и недостатки предлагаемого способа идентификации линейных объектов.

Показано, что для систем диагностики и для адаптивных регуляторов выбор гармоник с определенными номерами из разложения в ряд Фурье реакции объекта на тестирующий импульс может позволить одновременно оценить изменения положений контрольных точек АЧХ объекта в процессе его эксплуатации и использовать эту информацию для диагностики состояния объекта и подстройки параметров в адаптивных регуляторах.

Статья выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-01-00054).

Литература

1. Гинсберг К.С., Басанов Д.М. Идентификация и задачи управления // Идентификация систем и задачи управления: Пленарные доклады IV Междунар. конф. М.: Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова РАН, 2005. С. 56—63.
2. Rao G.P., Unbehauen H. Identification of Continuous-time Systems // IEEE Control Theory and Appl. 2006. V. 153. No. 2. Pp. 185—220.
3. Штейнберг Ш.Н. Идентификация в системах управления. М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Jouffroy J., Reger J. Finite-time Simultaneous Parameter and State Estimation Using Modulating Functions // IEEE Conf. Control Appl. 2015. Pp. 394—399.
5. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Изд-во МЭИ, 2004.
6. Мазуров В.М., Литюга А.В., Синцын А.В. Развитие технологий адаптивного управления в SCADA системе TRACE MODE // Приборы и системы управления, контроль, диагностика. 2002. № 1. С. 17—22.
7. Frohr F., Ortenburger F. Introduction to Electronic Control Engineering. London: Siemens, 1982.
8. Perlman I. The Electroretinogram: ERG [Электрон. ресурс] <http://www.webvision.ERG>. (дата обращения 01.06.2017).
9. Marmor F. e. a. SCEV Standard for Full-field Clinical Electroretinography // Doc Ophthalmol. 2009. V. 118. Pp. 69—77.

10. Zueva M., Tsapenko I., Vaskov S. The Components of Human and Rabbit 8-Hz and 12-Hz Flicker Erg as a Function on Intensity, Size and Position of Stimuli // Abstracts of 42nd ISCEV Symp. 2004. P. 132

11. Колосов О.С. и др. Оценка частотных свойств динамического объекта с использованием импульсных тестирующих сигналов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 4. С. 219—226.

12. Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. М.: Наука, 1973.

13. Ungarala S., Co T.B. Time-varying System Identification Using Modulating Functions and Spline Models with Application to Bio-processes // Computers and Chemical Eng. 2000. No. 24 (12). Pp. 2739—2753.

14. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1967.

15. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 2013.

16. Применение цифровой обработки сигналов / под ред. А.М. Рязанцева. М.: Мир, 1980.

17. Anisimov D.N. e. a. Diagnosis of the Current State of Dynamic Objects and Systems with Complex Structures by Fuzzy Logic Using Simulation Models // Sci. and Techn. Information Proc. 2013. V. 40. No. 6. Pp. 365—374.

18. Корневский Н.А., Снопков В.Н., Бурмака А.А., Рябкова Е.Б. Проектирование медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений на основе нечетких информационных технологий // Врач и информационные технологии. 2013. № 6. С. 48—53.

References

1. Ginsberg K.S., Basanov D.M. Identifikatsiya i Zadachi Upravleniya. Identifikatsiya Sistem i Zadachi Upravleniya: Plenarnye Doklady IV Mezhdunar. Konf. M.: In-t Problem Upr. im. V.A. Trapeznikova RAN, 2005: 56—63. (in Russian).
2. Rao G.P., Unbehauen H. Identification of Continuous-time Systems. IEEE Control Theory and Appl. 2006;153;2:185—220.
3. Shteynberg Sh.N. Identifikatsiya v Sistemakh Upravleniya. M.: Energoatomizdat, 1987. (in Russian).
4. Jouffroy J., Reger J. Finite-time Simultaneous Parameter and State Estimation Using Modulating Functions. IEEE Conf. Control Appl. 2015:394—399.
5. Rotach V.YA. Teoriya Avtomaticheskogo Upravleniya. M.: Izd-vo MPEI, 2004. (in Russian).
6. Mazurov V.M., Lityuga A.V., Sintsyn A.V. Razvitie Tekhnologiy Adaptivnogo Upravleniya v SCADA Sisteme TRACE MODE. Pribory i sistemy Upravleniya, Kontrol', Diagnostika. 2002; 1:17—22. (in Russian).
7. Frohr F., Ortenburger F. Introduction to Electronic Control Engineering. London: Siemens, 1982.
8. Perlman I. The Electroretinogram: ERG [Elektron. Resurs] <http://www.webvision.ERG>. (Data Obrashcheniya 01.06.2017).
9. Marmor F. e. a. SCEV Standard for Full-field Clinical Electroretinography. Doc Ophthalmol. 2009;118:69—77.

10. **Zueva M., Tsapenko I., Vaskov S.** The Components of Human and Rabbit 8-Hz and 12-Hz Flicker Erg as a Function on Intensity, Size and Position of Stimuli. Abstracts of 42nd ISCEV Symp. 2004:132

11. **Kolosov O.S. i dr.** Otsenka Chastotnykh Svoystv Dinamicheskogo Ob"ekta s Ispol'zovaniem Impul'snykh Testiruyushchikh Signalov. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2017;4:219—226. (in Russian).

12. **Popov E.P.** Prikladnaya Teoriya Protsesov Upravleniya v Nelineynykh Sistemakh. M.: Nauka, 1973. (in Russian).

13. **Ungarala S., Co T.B.** Time-varying System Identification Using Modulating Functions and Spline Models with Application to Bio-processes. Computers and Chemical Eng. 2000;24 (12):2739—2753.

14. **Ango A.** Matematika dlya Elektro- i Radioinzhenеров. M.: Nauka, 1967. (in Russian).

15. **Sergienko A.B.** Tsifrovaya Obrabotka Signalov. SPb.: BKHV-Peterburg, 2013. (in Russian).

16. **Primenenie** Tsifrovoy Obrabotki Signalov / pod red. A.M. Ryazantseva. M.: Mir, 1980. (in Russian).

17. **Anisimov D.N. e. a.** Diagnosis of the Current State of Dynamic Objects and Systems with Complex Structures by Fuzzy Logic Using Simulation Models. Sci. and Techn. Information Proc. 2013;40;6:365—374.

18. **Korenevskiy N.A., Snopkov V.N., Burmaka A.A., Ryabkova E.B.** Proektirovanie Meditsinskikh Intellektual'nykh Sistem Podderzhki Prinyatiya Resheniy na Osnove Nechetkikh Informatsionnykh Tekhnologiy. Vrach i Informatsionnye Tekhnologii. 2013;6:48—53. (in Russian).

Сведения об авторах

Колосов Олег Сергеевич — доктор технических наук, профессор кафедры управления и информатики НИУ «МЭИ», e-mail: KolosovOS@mpei.ru

Пронин Алексей Дмитриевич — аспирант кафедры управления и информатики НИУ «МЭИ», e-mail: dorin007@mail.ru

Information about authors

Kolosov Oleg S. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Control and Informatics Dept., NRU MPEI, e-mail: KolosovOS@mpei.ru

Pronin Aleksey D. — Ph.D-student of Control and Informatics Dept., NRU MPEI, e-mail: dorin007@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2017