УДК 517.925.54:517.962.27/.8

ADAPLAB-M: ДИРЕКТИВА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ С САМОНАСТРОЙКОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СИГНАЛА

А.Г. Александров
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: alex7@ipu.rssi.ru

Ю.Ф. Орлов
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Россия, 119992, Москва, Ленинские горы

Ключевые слова: программное обеспечение, идентификация, частотный подход
Key word: software, identification, frequency domain approach

В работе описывается директива для идентификации объекта при произвольных ограниченных внешних возмущениях с самонастройкой испытательного сигнала. Реализована она в системе MATLAB. Приведен пример работы с директивой.
ADAPLAB-M: DIRECTIVE FOR IDENTIFICATION WITH TEST SIGNAL SELFTUNING / A.G. Alexandrov (Institute of Control Sciences, 65, Profsoyuznaya, Moscow, 117997, Russia, E-mail: alex7@ipu.rssi.ru), Yu.F. Orlov (Moscow State University, Leninskiye gory, Moscow, 119992, Russia). In the paper new directive for identification of plant excited by a external disturbance with test signal selftuning is described. This is a system MATLAB realization. An example of the directive application is given.

1. Введение

В последние десятилетия развиваются методы идентификации линейных объектов управления, когда внешние возмущения и помехи являются неизвестными ограниченными функциями. В этих случаях к объекту прикладываются специально формируемые воздействия (испытательные сигналы). Для идентификации используются методы инструментальных переменных [1], конечно-частотной идентификации [2], рандомизированные алгоритмы [3].

Естественное ограничение на выбор испытательного сигнала: независимость его от возмущений и помех (некоррелированность с ними). Такой сигнал не должен также заметно влиять на режим нормальной эксплуатации объекта и снижать качество управления. Для выполнения этих условий необходима самонастройка испытательного сигнала в процессе идентификации объекта в реальных условиях. MATLAB-приложение ADAPLAB-M, являющееся программным обеспечением конечно-частотной идентификации и частотного адаптивного управления содержит директивы[1]: «Конечно-частотная идентификация» [4], и «Самонастройка испытательного сигнала» [5].

В настоящей работе излагается директива `D111sefad`: «Конечно-частотная идентификация с самонастройкой испытательного сигнала», которая является объединением указанных выше директив для одномерных объектов (объектов с одним измеряемым входом и одним измеряемым выходом). Эта директива дает новые возможности для идентификации, так как в отличие от существующих MATLAB-пакетов “System Identification Toolbox” и “Frequency Domain Identification” [6], в ней учитывается ограничение входа и выхода объекта управления и проверяется некоррелированность испытательного сигнала с возмущениями и помехами.

2. Область применения

Рассмотрим асимптотически устойчивый объект, описываемый дифференциальным уравнением

$$(1)\qquad y^{(n)}+d_{n-1}y^{(n-1)}+\cdots+d_1\dot{y}+d_0y = k_\gamma u^{(\gamma)}+\cdots+k_1\dot{u}+k_0u+f, \quad t \geq t_0,$$

где $y(t)$ – измеряемый выход, $u(t)$ – измеряемый вход (испытательный сигнал), $f(t)$ – неизвестное ограниченное возмущение: $|f(t)| \leq f^*$, где f^* – число. Коэффициенты d_i и k_j $\left(i = \overline{0, n-1},\ \ j = \overline{0, \gamma}\right)$ – неизвестные числа, n и $\gamma < n$ известны.

Выход и вход объекта управления (1) ограничены:

$$(2)\qquad |y(t)| \leq y_-, \quad |u(t)| \leq u_-, \quad t \geq t_0,$$

где y_- и u_- – заданные числа. Число y_- таково, что выполняется условие

$$(3)\qquad |\bar{y}(t)| < y_-, \quad t \geq t_0,$$

в котором $\bar{y}(t)$ – «естественный» выход объекта (выход в режиме его нормальной эксплуатации), когда испытательный сигнал отсутствует $(u(t) = 0)$.

Примечание 1. Понятие «естественный» выход объекта может включать в себя более общий случай, когда к объекту (1) наряду с возмущениями $f(t)$ приложен управляющий сигнал $u_{\text{prog}}(t)$. В этом случае в уравнении (1): $u(t) = u_{\text{prog}}(t) + u_{\text{test}}(t)$, где $u_{\text{test}}(t)$ – испытательный сигнал. Включая функцию $k_\gamma u_{\text{prog}}^{(\gamma)} + \cdots + k_1\dot{u}_{\text{prog}} + k_0u_{\text{prog}}$ в функцию $f(t)$ и опуская нижний индекс в обозначении испытательного сигнала $u_{\text{test}}(t)$, приходим к уравнению (1), в котором «естественный» выход объекта возбуждаем не только возмущением $f(t)$, но и управлением $u_{\text{prog}}(t)$. Ограничения (2) и условие (3) означают, что испытательный сигнал использует лишь остаточные (остающиеся в режиме нормальной эксплуатации объекта) ресурсы $|\bar{y}(t)| - y_-$ определяющиеся числами y_- и u_-. ■

[1] Директива – это программа, формирующая интерфейс (ввода исходных данных, вывода промежуточных данных и результатов вычислений), производящая необходимые вычисления (содержащая расчетную часть, позволяющую решать точно описанный класс задач автоматического управления либо идентификации), и формирующая протокол по завершении своей работы.

Задача идентификации состоит в нахождении оценок коэффициентов объекта (1) при ограничениях (2). Директива `D111sefad`: «Конечно-частотная идентификация с самонастройкой испытательного сигнала» служит для решения этой задачи. Функции этой директивы могут быть использованы для планирования эксперимента идентификации. Для этой цели используется технологическая модель объекта, которая описывается уравнением (1) с коэффициентами, определяющимися на основе знаний специалиста (технолога) об идентифицируемом объекте. Это некоторая *предполагаемая* модель истинного объекта и она может существенно отличаться от истинной его модели. Коэффициенты алгоритма самонастройки испытательного сигнала, полученные с ее помощью являются первыми их значениями в реальном эксперименте.

3. Особенности

Идентификация состоит из двух процессов:

1. Определение нижней границы `freqlow` испытательных частот (функция `TunFreq`).

2. Нахождение оценок коэффициентов объекта (функция `IdPla`).

Каждый из этих процессов состоит из двух подпроцессов:

1. Самонастройка амплитуды испытательного сигнала (функция `TunAmp`), необходимая для обеспечения требований (2) к границам входа и выхода объекта.

2. Фурье-фильтрация выхода (функция `TunFour`) с самонастройкой ее длительности (определения времени фильтрации, обеспечивающего требуемую точность вычисления частотных параметров объекта). Если эта точность не достигается, то это означает коррелированность гармоники испытательного сигнала с внешним возмущением, и поэтому эта гармоника не может быть использована для идентификации.

Каждый из подпроцессов состоит из испытаний, в которых к объекту (1) в течении интервала идентификации Δt прикладывается испытательный сигнал

$$
\begin{gathered}
u(t) = \rho^{[i]} \sin \omega (t - t_{i-1}), \quad i = \overline{1, N_a + N_d}, \\
t_{i-1} \leq t < t_i, \quad \Delta t = t_i - t_{i-1} = pT_b,
\end{gathered}
\tag{4}
$$

в котором ω – заданная испытательная частота, i – номер базового периода испытаний, заданной длительности $T_b = 2\pi/\omega_b$, где ω_b – базовая частота (например, в процессе 2 – нахождения оценок коэффициентов объекта – это наименьшая из испытательных частот), p – коэффициент алгоритма идентификации – заданное число (по умолчанию $p = 3$), $\rho^{[i]}$ – амплитуда испытательного сигнала при i-том испытании, N_a – число периодов испытаний при самонастройке амплитуд, N_d – число периодов испытаний при Фурье-фильтрации.

На этапе планирования эксперимента объект (1) моделируется m-функцией `Analysis`. Структуру директивы `D111sefad` удобно описывать, используя скобки Бекуса:

`<D111sefad>=<интерфейс><TunFreq><IdPla><протокол>`,
`<интерфейс>=<исходные данные><преобразование исходных данных>`,
`<исходные данные>=<полиномы` $d(s)$ `и` $k(s)$ `объекта><параметры par внешнего возмущения><граница выхода –` y_- `и входа –` u_-`><интервал дискретности` h`>`.

4. Функции

4.1. Функции для определения нижней границы испытательных частот

Частоты испытательного сигнала должны удовлетворять [7] условиям

$$\omega_l \leq \omega \leq \omega_u,$$

где ω_l и ω_u – нижняя и верхняя границы собственных частот объекта. Эти границы определяются постоянными времени его передаточной функции

$$w(s) = Ks^q \frac{\prod\limits_{k=1}^{\check{p}} (\check{T}_k s + 1) \prod\limits_{k=1}^{\breve{p}} \left(\breve{T}_k^2 s^2 + 2\breve{T}_k \breve{\xi}_k s + 1\right)}{\prod\limits_{k=1}^{\bar{p}} (\bar{T}_k s + 1) \prod\limits_{k=1}^{\tilde{p}} \left(\tilde{T}_k^2 s^2 + 2\tilde{T}_k \tilde{\xi}_k s + 1\right)}, \tag{5}$$

где

$$\omega_l = \min\left\{\frac{1}{\bar{T}_{k_1}}, \frac{1}{\left|\check{T}_{k_2}\right|}, \frac{1}{\tilde{T}_{k_3}}, \frac{1}{\left|\breve{T}_{k_4}\right|}\right\}, \quad \omega_u = \max\left\{\frac{1}{\bar{T}_{k_1}}, \frac{1}{\left|\check{T}_{k_2}\right|}, \frac{1}{\tilde{T}_{k_3}}, \frac{1}{\left|\breve{T}_{k_4}\right|}\right\}$$
$$k_1 = \overline{1, \bar{p}} \quad k_2 = \overline{1, \check{p}} \quad k_3 = \overline{1, \tilde{p}} \quad k_4 = \overline{1, \breve{p}}.$$

Оценка нижней границы находится по формуле

$$\hat{\omega}_l = \frac{\omega \alpha(\tau)}{\beta(\tau)}, \tag{6}$$

в которой ω – заданное достаточно малое число, а $\alpha(\tau)$ и $\beta(\tau)$ – оценки частотных параметров объекта (на частоте ω) являющиеся выходами фильтра Фурье

$$\begin{aligned} \alpha(\tau) &= \frac{2}{\rho\tau} \int\limits_{t_F}^{t_F+\tau} y(t) \sin \omega(t - t_F)\, dt, \\ \beta(\tau) &= \frac{2}{\rho\tau} \int\limits_{t_F}^{t_F+\tau} y(t) \cos \omega(t - t_F)\, dt, \end{aligned} \tag{7}$$

где τ – время фильтрации, кратное T_b, а t_F – момент начала фильтрации.

В соответствии с алгоритмом [8] определения нижней границы испытательных частот, задается достаточно малое число $\omega = \omega_0$ (ω_0 – коэффициент алгоритма идентификации) и, с помощью функции `TunAmp`, определяется амплитуда испытательного сигнала.

Поиск амплитуды ρ осуществляется уменьшением его значения, начиная с $\rho = u_-$, если не выполняется требование к выходу объекта (при выполнении этого требования искомое $\rho = u_-$). Интервал $\Delta t = pT_b$. Базовый период испытаний $T_b = 2\pi/\omega_0$.

По окончании процесса настройки амплитуд, когда найдена амплитуда ρ^*, функция `TunAmp` вычисляет показатель интенсивности испытательного сигнала

$$\text{æ} = \frac{|y_{\max} - \bar{y}_{\max}|}{|y_{\max}|}, \tag{8}$$

где

$$y_{\max} = \max_{t_F+\tau/2 \le t \le t_F+\tau} |y(t)|, \quad \bar{y}_{\max} = \max_{t_F+\tau/2 \le t \le t_F+\tau} |\bar{y}(t)|, \quad \tau = T_b.$$

При амплитуде $\rho = \rho^*$ с помощью функции `TunFour` находятся оценки частотных параметров $\alpha(\tau)$ и $\beta(\tau)$. Здесь время фильтрации определяется из условий

$$\left|\frac{\bar{\alpha}(\tau)}{\alpha(\tau)}\right| \le \varepsilon_\alpha, \quad \left|\frac{\bar{\beta}(\tau)}{\beta(\tau)}\right| \le \varepsilon_\beta, \tag{9}$$

в которых $\bar{\alpha}(\tau)$ и $\bar{\beta}(\tau)$ – выходы фильтра Фурье (7) при $y(t) = \bar{y}(t)$, а ε_α и ε_β – коэффициенты алгоритма идентификации – заданные числа (по умолчанию $\varepsilon_\alpha = \varepsilon_\beta = 0.001$). При фиксированном $\tau = \tau^*$ числа $|\bar{\alpha}(\tau^*)/\alpha(\tau^*)|$ и $|\bar{\beta}(\tau^*)/\beta(\tau^*)|$ называются *коэффициентами динамической корреляции.*

После выполнения неравенств (9) при некотором $\tau = \tau_1$, по формуле (6) вычисляется оценка нижней границы $\omega_l^{(1)}$. Затем изложенное повторяется для $\omega = \omega_0/2$ и при некотором $\tau = \tau_2$ находится новая оценка $\omega_l^{(2)}$, и т.д., до тех пор, пока не выполнится условие

$$\frac{\left|\omega_l^{(i)} - \omega_l^{(i-1)}\right|}{\left|\omega_l^{(i-1)}\right|} \le \varepsilon_\omega, \quad i = 1, 2, \ldots,$$

где ε_ω – коэффициент алгоритма идентификации – заданное число (по умолчанию $\varepsilon_\omega = \texttt{epsDo} = 0.2$).

Далее *элементарными* называются m-функции, с помощью которых выполняются содержательные для данной директивы операции. Так, `TunAmp` и `TunFour` являются элементарными m-функциями (em-функциями).

Объединение нескольких m- и em-функций называется *укрупненной* m-функцией (am-функцией). Функция `TunFreq`, служащая для определения нижней границы испытательных частот (`omlow`) является am-функцией. Она имеет структуру

`<TunFreq>=<TunAmp><TunFour>`.

4.2. Функции нахождения оценок коэффициентов объекта

После нахождения нижней границы испытательных частот определяются сами испытательные частоты. Для этой цели используется m-функция `TestOm2`. Эти частоты определяются как

$$\log\omega_k = \log\omega_l + (k-1)\frac{\log\omega_u - \log\omega_l}{n} \quad k = \overline{2,n},$$

где верхняя граница $\omega_u = \omega_l \cdot M$, M – заданное число – коэффициент алгоритма идентификации (по умолчанию $M = 30$).

Объект возбуждается испытательным сигналом (4) с частотами ω_k $\left(k=\overline{1,n}\right)$ (при этом $T_b = 2\pi/\omega_1$). Амплитуды находятся с помощью em-функции `TunAmp`, а частотные параметры – с помощью em-функции `TunFour`.

Em-функция `FrId` позволяет найти оценки коэффициентов объекта по оценкам его частотных параметров. Am-функция `IdPla` нахождения оценок коэффициентов объекта имеет структуру

`<IdPla>=<TestOm2><TunAmp><TunFour><FrId>`.

5. Пример

Рассмотрим объект, описываемый уравнением

$$d_3\dddot{y} + d_2\ddot{y} + d_1\dot{y} + d_0 y = k_1\dot{u} + k_0 u + f. \tag{10}$$

Его выход и вход ограничены значениями

$$y_- = 1.5, \quad u_- = 3.$$

Задача состоит в том, чтобы найти оценки коэффициентов d_i, k_j $\left(i = \overline{0,3},\ j = \overline{0,1}\right)$ объекта.

Примечание 2. В численных экспериментах по идентификации объекта (10) использовалась технологическая модель [9] с коэффициентами

$$d_3 = 0.2, \quad d_2 = 1.24, \quad d_1 = 5.24, \quad d_0 = 1; \quad k_1 = -0.4, \quad k_0 = 1, \tag{11}$$

возмущением $f(t) = \mathrm{sign}(\sin 2.75t)$ и интервалом дискретности $h = 0.01$c.

Передаточная функция объекта (10) с коэффициентами (11) имеет вид

$$w(s) = \frac{-0.4s+1}{(5s+1)(0.04s^2+0.24s+1)} = -2\frac{s-2.5}{(s+0.2)(s^2+6s+25)}. \qquad \blacksquare$$

В результате работы директивы `D111sefad` получено следующее:

1. Определена нижняя граница испытательных частот объекта $\hat{\omega}_l = 0.19$ ($\omega_0 = 0.1$). Это результат работы am-функции `TunFreq`.

2. Используя эту величину найдены испытательные частоты:

$$\omega_1 = 0.19, \quad \omega_2 = 1.14, \quad \omega_3 = 5.73,$$

   и получены оценки коэффициентов объекта:

$$\hat{d}_3 = 0.206, \quad \hat{d}_2 = 1.24, \quad \hat{d}_1 = 5.26, \quad \hat{d}_0 = 1; \quad \hat{k}_1 = -0.4037, \quad \hat{k}_0 = 1.0001.$$

   Это результат работы am-функции `IdPla`.

3. Передаточная функция идентифицированного объекта имеет вид

$$\hat{w}(s) = -1.95\frac{s-2.477}{(s+0.198)(s^2+5.85s+24.35)}.$$

Список литературы

1. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991.
2. Александров А.Г. Адаптивное управление на основе идентификации частотных характеристик // Известия РАН: «Теория и системы управления», 1995. № 2. С. 63-71.
3. Граничин О.Н., Поляк Б.Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. М.: Наука, 2003.
4. Alexandrov A.G., Orlov Yu.F., Mikhailova L.S. Identification and Adaptation Toolbox for MATLAB // 13-th Symposium on System Identification. Rotterdam, 2003. on CD-ROM. P. 995-1000.
5. Александров А.Г., Орлов Ю.Ф., Михайлова Л.С. АДАПЛАБ-М: директива для самонастройки испытательного сигнала // Труды II Всероссийской научной конференции: «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB». М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2004. CD-ROM № ISBN 5-201-14971-5. С. 6-17.
6. Дьяконов В.П., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002.
7. Александров А.Г. Конечно-частотная идентификация: границы частот испытательного сигнала // Автоматика и телемеханика, 2001. Т. 62. № 11.
8. Александров А.Г. Конечно-частотная идентификация: самонастройка испытательного сигнала // Сборник научных трудов: «Робастное управление и частотная идентификация», Электросталь: ЭПИ МИСиС, 2004. С. 67-97.
9. Graebe S.F. Robust and adaptive control of an unknown plant: A benchmark of new format // 12-th World Congress of IFAC. Sydney. Australia. Preprints, 1993. V. III. P. 165-170.

Приложение

П.1. М-функции

Cauchy1 – функция построения матриц объекта в форме Коши по коэффициентам формы (1) «вход-выход»

Синтаксис:

`[A, B, C, D] = Cauchy1 (d, k, m)`

Исходные данные:

`d` – вектор коэффициентов при выходном сигнале объекта,

`k` – вектор коэффициентов объекта при управлении,

`m` – вектор коэффициентов объекта при возмущении.

Результаты вычислений:

`A, B=[B1 B2], C, D=[D1 D2]` – матрицы объекта в форме Коши: $\dot{\boldsymbol{x}} = \mathtt{A}\cdot\boldsymbol{x} + \mathtt{B1}\cdot\boldsymbol{u} + \mathtt{B2}\cdot\boldsymbol{f}$, $\boldsymbol{y} = \mathtt{C}\cdot\boldsymbol{x} + \mathtt{D1}\cdot\boldsymbol{u} + \mathtt{D2}\cdot\boldsymbol{\eta}$.

Analysis – функция моделирования при произвольных входных воздействиях

Синтаксис:

`[y, x] = Analysis (A, B, C, D, [u;f], t, x, flag)`

Исходные данные:

`[u;f]` – матрица входных воздействий $[u(t)$ и $f(t)]$,
`t` – временна́я сетка (вектор времени моделирования),
`x` – начальный вектор состояния,
`flag` – флаг построения графика:
`flag` $\neq 0$ – график строить, `flag` $= 0$ – график не строить.

Результаты вычислений:

`y` – вектор выходных переменных,
`x` – конечный вектор состояния.

TestOm2 – функция формирования испытательных частот

Синтаксис:

`om = TestOm2 (n, omlow, omup, h)`

Исходные данные:

`n` – размер вектора состояния объекта,
`omlow` – нижняя граница испытательных частот,
`omup` – верхняя граница испытательных частот,
`h` – интервал дискретности.

Результаты вычислений:

`om` – n-мерный вектор испытательных частот.

П.2. Em-функции

TunAmp – функция самонастройки амплитуды испытательного сигнала

Синтаксис:

```
[rho, Tend,x, kap] = TunAmp ...
     (A,B,C,D, rho,omega, par, N, h, y_,u_, Tbegin,x, flag)
```

Исходные данные:

`rho` – начальная амплитуда испытательного сигнала,
`omega` – частота испытательного сигнала,
`par` – вектор параметров внешнего возмущения (первый элемент – `par(1)` – тип возмущения: 1 – ступенька, 2 – гармоника, 3 – меандр, и т.д.),
`N` – число шагов при фиксированном `rho`,
`h` – интервал дискретности,
`y_` – ограничение на выход объекта: $|y(t)| < y_{-}$,
`u_` – ограничение на вход объекта: $|u(t)| < u_{-}$,
`Tbegin, x` – время (момент) начала самонастройки и вектор состояния.

Результаты вычислений:

`rho` – амплитуда испытательного сигнала,

`Tend, x` – время (момент) окончания самонастройки и вектор состояния,

`kap` – показатель интенсивности (8) испытательного сигнала.

TunFour – функция Фурье-фильтрации с самонастройкой времени фильтрации

Синтаксис:

```
[alf,bet, Dfa,Dfb, Tend,x] = TunFour ...
(A,B,C,D,rho,omega,par,N,h,epsDa,epsDb,Pmax,Tbegin,x,flag)
```

Исходные данные:

`epsDa,epsDb` – коэффициенты алгоритма идентификации из условий (9) (по умолчанию $\varepsilon_\alpha = \varepsilon_\beta = 10^{-3}$),

`Pmax` – ограничение на число циклов самонастройки времени фильтрации.

Результаты вычислений:

`alf,bet` – оценки частотных параметров [вещественной – `alf` и мнимой – `bet` части передаточной функции (5) объекта (1)],

`Dfa,Dfb` – коэффициенты динамической корреляции.

FrId – функция решения частотных уравнений идентификации

Синтаксис:

```
[d, k] = FrId (n, gam, im*om, alf+im*bet)
```

Исходные данные:

`n` – степень знаменателя искомой передаточной функции,

`gam` – степень числителя искомой передаточной функции,

`im` – мнимая единица.

Результаты вычислений:

`d` – n-мерный вектор коэффициентов знаменателя передаточной функции,

`k` – γ-мерный вектор коэффициентов числителя передаточной функции.

П.3. Am-функции

TunFreq – функция нахождения нижней границы испытательных частот

Синтаксис:

```
[omlow, Tend, x] = TunFreq ...
(A, B, C, D, par, pa, N, h, y_, u_, Tbegin, x, flag)
```

Исходные данные:

`pa` – вектор параметров алгоритма идентификации.

Результаты вычислений:

`omlow` – нижняя граница испытательных частот.

IdPla – функция частотной идентификации при известной нижней границе испытательных частот

Синтаксис:
`[d,k,Tend,x]=IdPla(A,B,C,D,par,pa,omlow,y_,u_,h,Tbegin,x)`

П.4. Dm-функции – директивы (как объединение am-функций)

D111sefad – функция конечно-частотной идентификации

Синтаксис:
`[d, k] = D111sefad (d, k, m, par, pa, y_, u_, h)`

D111sad – функция конечно-частотной идентификации с заданными испытательными частотами (либо заданным `omlow`)

Синтаксис:
`[d, k] = D111sad (d, k, m, par, pa, om, y_, u_, h)`

D111 – функция конечно-частотной идентификации с заданными амплитудами и частотами испытательного сигнала, а также длительностью идентификации

Синтаксис:
`[d, k] = D111 (d, k, m, par, pa, om, ro, h, N)`

Исходные данные:
`ro` – заданный n-мерный вектор амплитуд испытательного сигнала.