

**В. П. ИВЕЛЬ, Ю. В. ГЕРАСИМОВА**

**ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ**

In the paper problems were studied of noise immunity of a system for control of underwater device and the problem was solved of increasing of accuracy of control at the expense of increase of input signal quality. The opportunity was analyzed of signal extraction of pressure sensor at a noise background of operating mechanisms. For decision a problem of interference suppression mathematical apparatus of Winner's theory of filtration is used. The structure of the device for interference suppression was offered. The example was presented of the given problem decision with the system of computer mathematics MatLab using. Results were presented of simulating a process of filtration with recursive algorithm of the least squares using. It was established that using of adaptive filtration, even if under low amplitude of the exemplary input signal and multiple noise exceeding over useful component in measured signal, allows to receive desired cleaned from noise signal without garbling.

Подводная техника играет немаловажную роль в освоении Мирового океана. Особое место среди всего разнообразия подводной техники занимают автономные самоходные подводные аппараты (ПА) и роботы. Подводные работы, выполняемые аппаратами этого класса, зачастую связаны с их длительным зависанием на определенной глубине, на которой находится объект работ или исследований. Такой режим работы требует точности стабилизации ПА на заданной глубине и минимизации расхода электроэнергии бортовыми аккумуляторами на работу исполнительных механизмов. Качество и точность управления ПА во многом зависят от точности и помехоустойчивости датчиков давления, которые являются чувствительными элементами, определяющими глубину нахождения ПА [1].

Проблема качественного и точного измерения глубины погружения ПА – это в основном проблема выделения сигнала датчика давления на фоне шумов исполнительных механизмов (ИМ) системы управления ПА. К

таким шумам относятся стационарные шумы, создаваемые работой гребных винтов, водяных насосов, регулирующих остаточную плавучесть ПА, и гидропневматической системой противодавления, которая разгружает работу ИМ на больших глубинах.

В этой работе решается задача подавления инструментальных помех в канале измерения давления, возникающих в результате работы исполнительных механизмов подводного аппарата, до уровня, необходимого для качественного управления глубиной погружения ПА.

В качестве исполнительного механизма для подобных ПА используются, как правило, электромеханический водяной насос, который, закачивая или откачивая воду из балластной камеры, уменьшает или увеличивает плавучесть ПА, удерживая его тем самым на заданной глубине [2].

Удобным математическим аппаратом при решении статистических задач подавления помех при стационарных входных сигналах является винеровская теория фильтрации [3]. На рис. 1 приведена схема классического винеровского фильтра с одним входом и одним выходом применительно к рассматриваемой задаче.

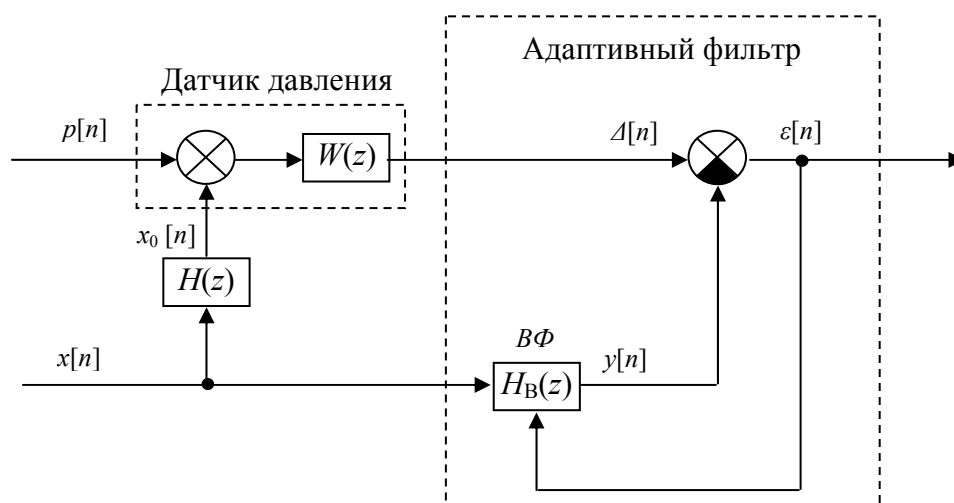


Рис. 1. Устройство подавления помех на основе винеровского фильтра

Входным (полезным) сигналом устройства является сигнал изменения давления в забортной среде  $p[n]$ . Без влияния на точность решения задачи передаточную функцию  $W(z)$  можно принять равной единице. На вход винеровского фильтра (ВФ) с дискретной передаточной функцией  $H_B(z)$  подается помеха  $v[n]$ , которая для фильтра является эталонным или входным сигналом. Сигнал  $\Delta[n]$  представляет электрическую величину, прямо пропорциональную сумме полезного сигнала  $p[n]$  и сигнала  $x_0[n]$  или, что-то же самое, сигнала  $x[n]$ , прошедшего через канал с дискретной передаточной функцией  $H(z)$ . Выходным сигналом устройства служит сигнал ошибки  $\varepsilon[n] = \Delta[n] - y[n]$ , где  $y[n]$  – выходной сигнал винеровского фильтра.

Смысл адаптивной фильтрации заключается в формировании такого сигнала  $y[n]$ , который бы представлял собой копию сигнала  $x_0[n]$ . Фильтр ВФ в процессе адаптации должен перестраиваться так, чтобы минимизировать общую мощность выходного сигнала ошибки или минимизировать математическое ожидание квадрата (дисперсию) сигнала ошибки:

$$E_{\min}[\varepsilon^2] = E[\varepsilon^2] + E[(x_0 - y)^2] + 2E[p(x_0 - y)]. \quad (1)$$

Поскольку  $p$  не коррелирован с  $x_0$  и  $y$ , получим

$$E_{\min}[\varepsilon^2] = E[\varepsilon^2] + E[(x_0 - y)^2]. \quad (2)$$

В идеальном случае  $E[(x_0 - y)^2] = 0$ , т.е.  $x_0 = y$  и сигнал совершенно не искажен помехой.

Вся технология фильтрации основана на предположении, что шум, возникающий при измерении давления, является случайным шумом с нормальным (Гаусовым) распределением. Для того чтобы устранить влияние посторонних помех, целесообразно измерить их с помощью дополнительных акустических датчиков, расположенных вблизи исполнительных механизмов, а затем полученную информацию использовать в системе адаптивной фильтрации. И хотя этот шум нельзя

непосредственно вычесть из полезного сигнала, поскольку два канала передачи шума – датчик давления и дополнительный измеритель имеют разные характеристики (передаточные функции), однако шумовые случайные процессы, воспринимаемые двумя измерительными устройствами, будут коррелированы между собой и не коррелированы с полезным сигналом.

Процесс адаптации к внешним помехам, заключающийся в подстройке весовых коэффициентов дискретного фильтра, предполагает использование специальных алгоритмов, способствующих достижению экстремума выбранного функционала качества адаптации. В системе компьютерной математики MatLab наиболее часто применяется рекурсивный метод наименьших квадратов (RLS – Recursive Least Square). Задача решается с использованием пакетов визуального моделирования Simulink и DSP системы MatLab. На рис. 2 представлена Simulink-модель адаптивного подавления помех с использованием RLS-фильтра.

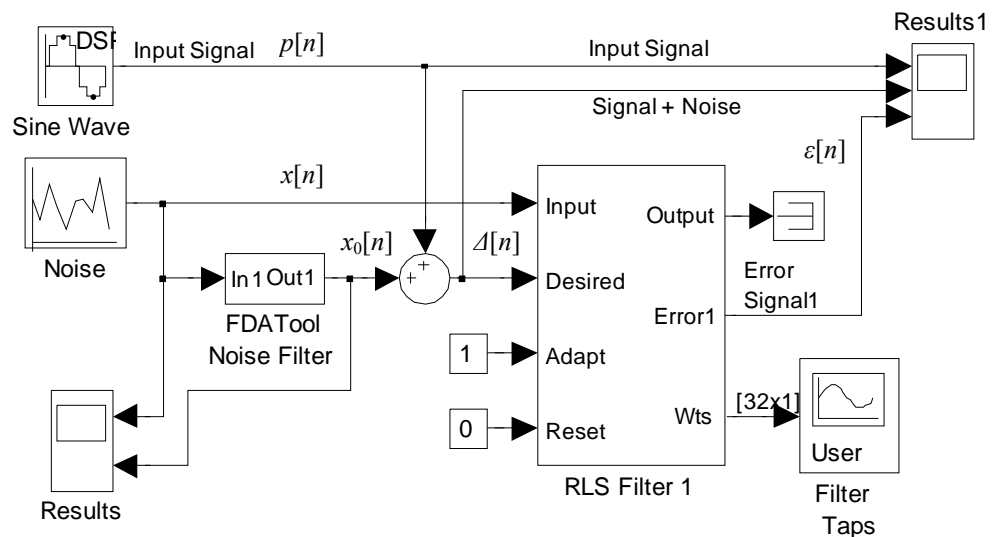


Рис. 2. Simulink-модель адаптивного фильтра

Модель содержит следующие блоки. Блок Sine Wave является источником сигнала, пропорционального забортному давлению. Как правило, этот сигнал имеет гармонический характер, близкий к

синусоидальному, поскольку в системе стабилизации глубины погружения ПА всегда присутствуют автоколебания. Примем для конкретного случая период автоколебаний равным 100 с (частота 0,02 Гц).

Подсистема Noise представляет собой источник случайного шума с нормальным распределением (Random Noise). Подсистема FDA Tool Noise Filter содержит нерекурсивный фильтр 31-го порядка и пропорциональное звено с коэффициентом усиления 0,7. На вход этой подсистемы поступает сигнал помехи, а с выхода снимается более низкочастотный сигнал. Подсистема имитирует различие характеристик двух измерительных каналов.

Блок RLS Filter 1, как уже упоминалось, реализует рекурсивный алгоритм наименьших квадратов. При таком алгоритме оценки коэффициентов фильтра можно обновлять матрицы коэффициентов усиления для каждого нового полученного набора входных данных без прямого повторного трудоемкого обращения. Основу этих вычислений составляет:

– расчет нового значения выходного сигнала фильтра  $y[n]$  с учетом новых входных данных  $\mathbf{u}[n]$  и расчет величины ошибки  $\varepsilon[n]$

$$y[n] = \mathbf{u}^T[n] \mathbf{w}[n-1],$$

$$\varepsilon[n] = \Delta[n] - y[n];$$

– расчет нового вектор-столбца коэффициентов усиления

$$\mathbf{R}[n] = \frac{\mathbf{P}[n-1] \mathbf{u}[n]}{1 + \mathbf{u}^T[n] \mathbf{P}[n-1] \mathbf{u}[n]};$$

– обновление оценки обратной корреляционной матрицы сигнала

$$\mathbf{P}[n] = \mathbf{P}[n-1] - \mathbf{R}[n] \mathbf{u}^T[n] \mathbf{P}[n-1];$$

расчет новых значений коэффициентов фильтра

$$\mathbf{w}[n] = \mathbf{w}[n-1] + \mathbf{R}[n] \varepsilon[n].$$

Сигнал ошибки (Error) является разностью зашумленного сигнала и суммарной помехи или нормальной оценкой. На рис. 3. показаны результаты моделирования.

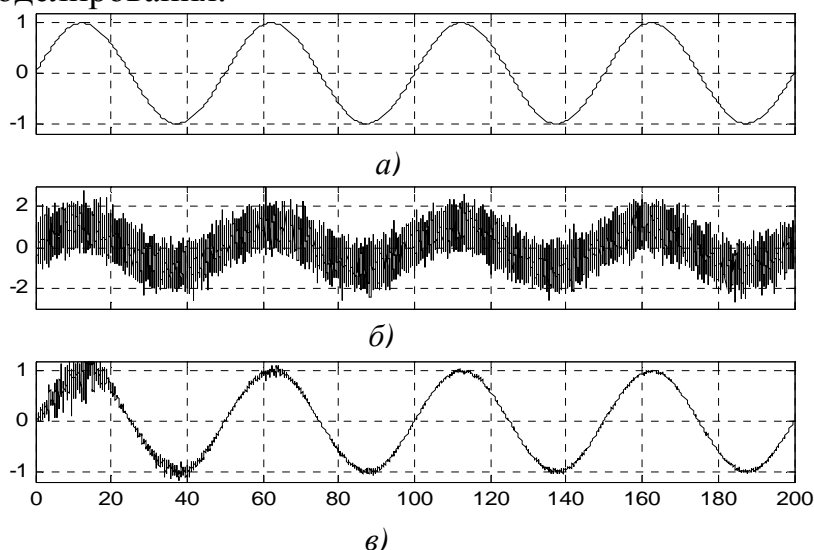


Рис. 3. Входной и выходные сигналы адаптивного фильтра

Сигнал с датчика давления без помех представлен на рис. 3, а. Зашумленный сигнал отображен в следующем окне на рис. 3, б. И наконец, уже отфильтрованный сигнал или информационный входной сигнал системы управления глубиной погружения ПА поступает на третий вход осциллографа Results 1 (см. рис. 3, в).

Сравнительный анализ показывает, что относительная погрешность отфильтрованного сигнала составляет 5%, а значит абсолютная ошибка стабилизации ПА на заданной глубине равняется 0,05 м. Этот уровень ошибки практически не оказывает влияния на управление подводным аппаратом. Полученный результат свидетельствует о высоком качестве фильтрации, достигнутого с помощью предложенного устройства подавления помех на основе винеровского фильтра.

Таким образом, рассмотрена возможность использования адаптивной фильтрации в системах управления самоходными подводными аппаратами на примере адаптивного подавления шума при измерении заборного давления в системе стабилизации глубины погружения подводного

аппарата. Установлено, что применение адаптивной фильтрации даже при низкой амплитуде образцового входного сигнала и многократном превышении шума над полезной составляющей в измеренном сигнале позволяет получить искомый очищенный от шума сигнал без искажений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматические подводные аппараты / Под общ. ред. М. Д. Агеева. Владивосток: Дальнаука, 2000. 272 с.
2. Системы и элементы глубоководной техники подводных исследований / Под общей ред. В. С. Ястребова. Л.: Судостроение, 1981. 304 с.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова. М.: МГТУ, 2004. Т. 1. 656 с.