

В.Ф. ФИЛАРЕТОВ

## Новый принцип построения следающих систем управления многосвязными динамическими объектами

*Представлен новый принцип управления сложными многосвязными объектами с переменными и неизвестными параметрами, реализуемый с помощью простых технических средств. Этот принцип позволяет значительно увеличить реальную точность движения данных объектов в пространстве за счет введения вспомогательной виртуальной траектории перемещения программной точки, а также за счет управления скоростью перемещения этой точки. Управление программными входными сигналами автоматически учитывает насыщения исполнительных приводов и обеспечивает максимально возможную скорость перемещения по предписанным траекториям.*

*Ключевые слова: следающие системы, динамическое управление, точность, виртуальная траектория, быстроедействие, переменные параметры.*

**The new principle of construction of servo-loop control systems of multiply connected dynamic objects.**  
V.F. FILARETOV (Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok).

*The new principle of control by difficult multiconnected objects with variable and unknown parameters, realized by means of simple means is presented. This principle allows considerably increasing real accuracy of movement of these objects in space, using an auxiliary virtual trajectory of motion of a program point, and also at the expense of a speed control of moving of this point. Control by program entrance signals automatically takes into account the saturation of executive drives and provides the greatest possible speed of motion along the ordered trajectories.*

*Key words: servo-loop control systems, dynamic control, accuracy, virtual trajectory, speed of response, variable parameters.*

Для управления различными динамическими объектами (ДО) в следающем режиме сегодня используются три основополагающих принципа: принцип обратной связи [19], принцип инвариантности, реализуемый в виде двухканального управления [1], а также принцип объединенного номинального и локального управления [18]. Однако для активно эксплуатируемых в последние десятилетия новых сложных многосвязных нелинейных ДО с существенно переменными и часто неизвестными параметрами (манипуляторов, подводных и других мобильных роботов) эти принципы уже не позволяют решать задачи их точного перемещения по предписанным траекториям с помощью относительно легко реализуемых регуляторов или не обеспечивают требуемой динамической точности высокоскоростного управления.

---

ФИЛАРЕТОВ Владимир Федорович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток). E-mail: filaretov@inbox.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-08-00347.

## Особенности нового принципа управления

В статье предлагается использовать новый, четвертый принцип управления, суть которого заключается в управлении не столько самими ДО в процессе их прохождения вдоль заданных пространственных траекторий (для этого необходимо использовать аппарат дифференциальных уравнений), сколько их программными сигналами в сочетании с простыми стационарными следящими системами управления (ССУ), устанавливаемыми в каждом канале управления и обеспечивающими только устойчивость соответствующих замкнутых контуров. При этом отклонения ДО от задаваемых траекторий не должны превышать допустимых значений. Основные идеи формирования этого принципа запатентованы в виде новых способов управления точными движениями ДО по произвольным гладким пространственным траекториям (в том числе и на предельно высоких скоростях, автоматически учитывающих ограничения их исполнительных элементов)<sup>1</sup>.

Новый принцип предполагает построение специальной виртуальной траектории для перемещения программной точки, которая не совпадает с предписанной траекторией движения объекта и используется только для формирования программного входного сигнала для ДО. При этом задействуется более простой аппарат алгебраических уравнений, позволяющий легче и быстрее (в реальном масштабе времени) реализовывать высокоточное управление указанными ДО даже на предельно высокой скорости их перемещения по произвольным гладким пространственным траекториям с учетом реальных ограничений уровня входных сигналов.

Обобщенная структурная схема ССУ одного канала управления, реализующей новый принцип управления, представлена на рис. 1 [3, 6, 8–11, 13–17].

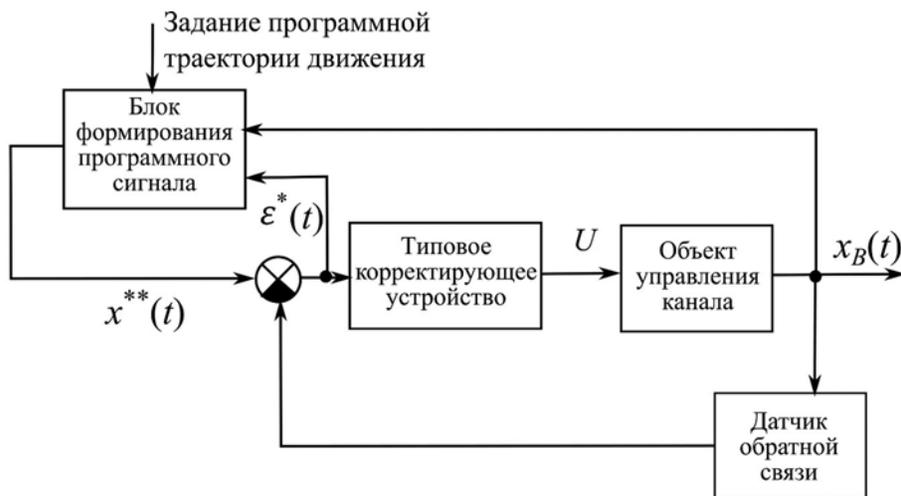


Рис. 1. Структурная схема системы с новым принципом управления. Условные обозначения:  $\varepsilon^*(t) = x^{**}(t) - x_B(t)$  – ошибка;  $x^{**}(t)$ ,  $x_B(t)$  – соответственно программный и выходной сигналы;  $u$  – входной сигнал

<sup>1</sup> Способ управления движением динамического объекта по пространственной траектории: пат. 2406103 РФ / В.Ф. Филаретов, заявл. 02.06.2009, опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34; Способ управления движением динамического объекта по пространственной траектории: пат. 2445670 РФ / В.Ф. Филаретов, Д.А. Юхимец, заявл. 06.07.2010, опубл. 20.03.2012, Бюл. № 8; Способ управления движением динамического объекта по пространственной траектории: пат. 2451970 РФ / В.Ф. Филаретов, Д.А. Юхимец, заявл. 09.02.2011, опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15; Способ управления движением динамического объекта по пространственной траектории: пат. 2480805 РФ / В.Ф. Филаретов, заявл. 03.04.2012, опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12.

Рассмотрим ДО, перемещающийся в абсолютной системе координат (АСК) по произвольной гладкой пространственной траектории и оснащенный типовой СУ вида:  $u(t) = F_u(\varepsilon(t), X^*(t))$ , где  $u(t) \in R^n$  – вектор сигналов управления;  $n$  – количество движителей, равное количеству степеней свободы ДО;  $X^*(t) = (x^*(t), y^*(t), z^*(t))^T \in R^3$ ,  $X(t) = (x(t), y(t), z(t))^T \in R^3$ ,  $\varepsilon(t) = X^*(t) - X(t) \in R^3$  – векторы координат программной точки на заданной пространственной траектории, текущего положения ДО в АСК и динамической ошибки системы. Элементы вектора  $X^*(t)$  удобнее представить в виде функций, описывающих произвольную гладкую криволинейную пространственную траекторию ДО в АСК с помощью сплайнов Безье третьего порядка и линейно зависящих от программной скорости этого движения  $v^*$ . При движении ДО вдоль криволинейной траектории, когда  $\varepsilon(t) \neq 0$ , вектор отклонения от этой траектории (от точки  $X_n$ )  $\varepsilon_n(t) \in R^3 \neq 0$  (рис. 2). Для упрощения пояснений выполняемых построений, реализующих идею предложенного нового принципа, на рис. 2 приведен фрагмент плоского движения ДО, хотя справедливость и методика всех выполняемых построений многократно (в процессе моделирования и экспериментальных исследований) проверялась и подтверждалась при произвольных видах гладких программных траекторий, имеющих произвольные пространственные конфигурации.

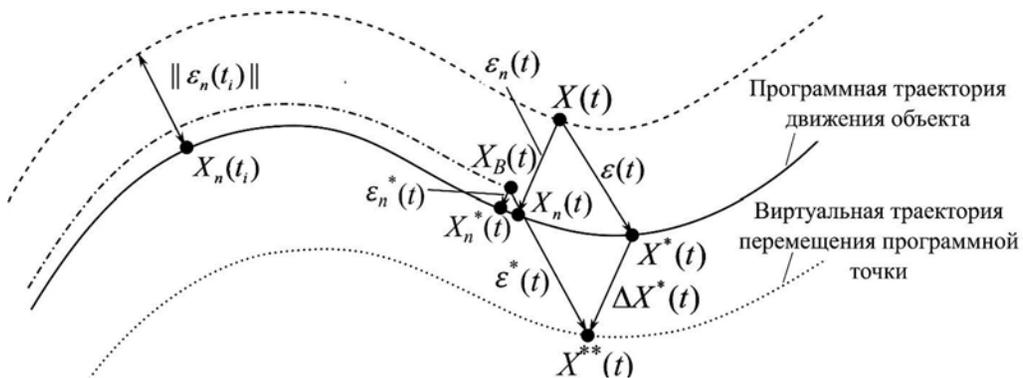


Рис. 2. Схема движения робота вблизи программной траектории

Решать задачу перемещения ДО вдоль любой траектории (сплошная линия на рис. 2), определяемой точкой  $X^*(t)$ , при отклонениях от нее не более чем на допустимое значение  $\varepsilon_{\text{доп}}$  при любой кривизне всех ее участков с максимально возможной скоростью  $v^*$ , ограниченной насыщениями в каналах управления, будем следующим образом.

Зададим виртуальную траекторию, определяемую новой программной точкой  $X^{**}(t) = X^*(t) + \Delta X^*(t) \in R^3$  (пунктирная линия на рис. 2), где  $\Delta X^*(t)$  – вектор дополнительного программного сигнала, смещающего точку  $X^*(t)$  с предписанной траектории движения ДО на виртуальную. При определении  $\Delta X^*(t)$  учтем, что, обрабатывая сигнал  $X^*(t)$ , ДО находится в точке  $X(t)$  на штриховой линии на расстоянии  $\|\varepsilon_n(t)\|$  от программной траектории. Если вместо сигнала  $X^*(t)$  использовать сигнал  $X^{**}(t)$ , траектория изменения которого копирует штриховую линию, располагаясь симметрично относительно программной траектории, то реальное движение ДО  $X_B(t)$  будет проходить уже по штрихпунктирной линии (см. рис. 2) на гораздо меньшем расстоянии от траектории  $X^*(t)$  и будет выполняться условие  $\varepsilon(t) = X^*(t) - X(t) \approx X^{**}(t) - X_B(t) = \varepsilon^*(t)$ . Заранее определить значения  $\|\varepsilon_n(t)\|$  невозможно, так как они зависят от параметров траектории  $X^*(t)$ , скорости движения ДО вдоль нее, параметров его взаимодействия с окружающей средой, динамических свойств ДО и т.д. Поэтому сигналы  $X^{**}(t)$  должны формироваться во время движения ДО.

Зададим  $\Delta X^*(t) = X_n^*(t) - X(t) = \varepsilon_n(t)$ . Тогда  $X^{**}(t) = X^*(t) + \varepsilon_n(t)$  и динамическая ошибка слежения ДО за точкой  $X^{**}(t)$  останется большой, но расстояние  $\|\varepsilon_n^*(t)\|$  между точкой  $X_B(t)$  и траекторией  $X^*(t)$  (точкой  $X_n^*(t)$ ) значительно уменьшится. Однако при введении  $\Delta X^*(t)$  определить сигнал  $X(t)$  невозможно, поскольку ДО будет находиться уже в точке

$X_B(t)$ . Поэтому сигнал  $\Delta X^*(t)$ , который будет удерживать ДО вблизи траектории  $X^*(t)$ , следует сформировать хотя бы приближенно, используя сигнал  $X_B(t)$ . Эта задача решается с помощью СУ ДО, изображенной на рис. 3 [3, 6, 8–11, 13–17]. СУ имеет два входа, на которые подаются сигналы  $X^{**}(t)$  и  $\varepsilon^*(t)$ . Но при формировании сигнала  $X^{**}(t)$  используется уже не сигнал  $\Delta X^*(t)$ , а сигнал  $\Delta X^{**}(t) = k_{en}[X_n^* - X^*(t)] = k_{en}\varepsilon_n^*(t)$  ( $\varepsilon_n^*(t) \ll \varepsilon_n$ ), где  $k_{en} = \text{const} > 1$  – коэффициент, определяемый типовыми методами теории управления с учетом выполнения условия устойчивости типовой следящей системы управления и неравенства  $\|\varepsilon_n^*(t)\| \leq \varepsilon_{\text{доп}}$  на всех участках заданной траектории.

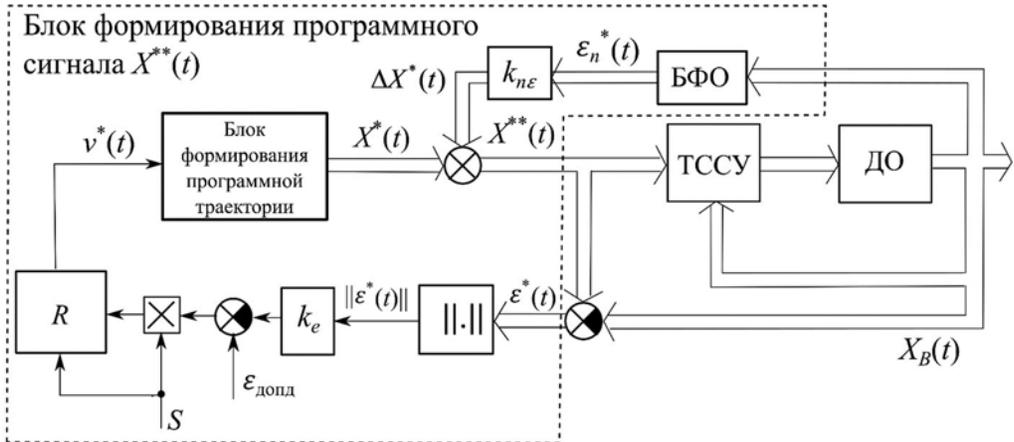


Рис. 3. Блок-схема системы, реализующей новый принцип управления. БФО – блок формирования вектора  $\varepsilon_n^*(t)$ ;  $S$  – сигнал прекращения движения ДО, ТССУ – типовая следящая система управления

Предложенный подход справедлив для любого вида СУ, используемой в ДО. Особенности этих СУ влияют только на величины  $k_{en}$ . Поскольку  $\|\varepsilon_n^*(t)\|$  много меньше радиуса кривизны траектории, то вектор  $\varepsilon_n^*(t)$  можно рассчитать приближенно, заменяя его вектором  $\varepsilon_{1n}^*(t)$ , перпендикулярным прямой, касательной в точке  $X^*(t)$  к траектории движения ДО. Координаты точки пересечения вектора  $\varepsilon_{1n}^*(t)$  и касательной определяются в полу-связанной с ДО системе координат с осями, всегда параллельными осям АСК, и центром, совпадающим с центром массы этого ДО и точкой  $X_B(t)$ . Аналитическое определение величины  $\varepsilon_{1n}^*(t) \cong \varepsilon_n^*(t)$  не представляет затруднений. В результате величину  $\Delta X^{**}(t)$  удастся рассчитать по формуле  $\Delta X^{**}(t) = k_{en}\varepsilon_n^*(t) \approx k_{en}\varepsilon_{1n}^*(t)$ . Но помимо получения этого сигнала можно обеспечить и максимально быстрое движение ДО вдоль траектории  $X^*(t)$  с учетом энергетических возможностей (ограничений) его приводов. Для этого осуществляется автоматическая подстройка величины  $v^*$  с учетом особенностей траектории движения ДО и возможного насыщения его движителей.

Для решения этой задачи использован метод, детально описанный в работе [9], где для формирования желаемой величины  $v^*(t)$  в систему (см. рис. 3) вводится дополнительный контур управления, изменяющий  $v^*(t)$  в зависимости от текущего значения  $\|\varepsilon^*(t)\|$ . При этом величина  $v^*(t)$  формируется с помощью выражения:  $v^*(t) = R(p)(\varepsilon_{\text{доп}} - k_e \|\varepsilon^*(t)\|)$ , а  $R(p)$  – типовая передаточная функция регулятора  $v^*(t)$ ,  $\varepsilon_{\text{доп}}$  – допустимая динамическая ошибка,  $k_e \leq 1/k_{en}$  – положительный коэффициент. Выбор  $R(p)$  и  $k_e$  подробно пояснен в работе [9]. Подстройка величины  $v^*(t)$  устраняет вход движителей ДО в насыщение, предотвращая его неконтролируемый сход с предписанной траектории.

## Экспериментальные исследования эффективности нового принципа управления

Результаты натурных морских экспериментальных исследований точности движения ДО при использовании нового принципа управления в процессе его перемещения по эталонной замкнутой плоской горизонтальной траектории, заданной в АСК точками  $(0,0,0) - (0,20,0) - (20,20,0) - (20,0,0) - (0,0,0)$  в метрах, представлены на рис. 4 [4, 5, 7, 12]. В качестве ДО выбран автономный подводный робот «Марк». Из этого рисунка видно, что по сравнению с типовым управлением удалось повысить динамическую точность его движения почти в 6 раз. При этом скорость движения менялась от 1,5 до 0,2 м/с при перемещении по участкам с различной кривизной.

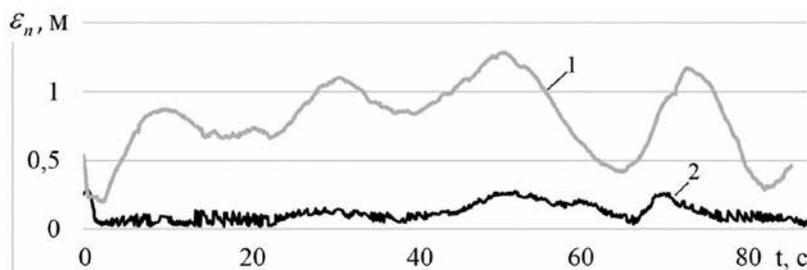


Рис. 4. Результаты экспериментов. Ошибки робота: 1 – при использовании типовой системы управления, 2 – при использовании нового принципа управления

Ввиду приближенности используемого алгоритма выполнения построений виртуальных траекторий перемещения программных точек непосредственно в процессе движения ДО кратность уменьшения величины  $\varepsilon_n$  при использовании нового принципа управления по сравнению с традиционным зависит от качества используемых регуляторов и особенно от кривизны программных траекторий (см. рис. 2) на конкретных участках движения ДО, а также от их пространственных конфигураций. Однако результаты многочисленных исследований, моделирований и экспериментальных проверок показали, что для известных типовых ДО и режимов их работы динамическая точность управления при использовании нового принципа всегда повышалась в диапазоне 4,5–7,5 раз, что является очень существенным результатом с учетом значительного снижения сложности и стоимости используемых систем управления.

### Заключение

Результаты математического моделирования работы различных типов мобильных ДО, оснащаемых системами управления, построенными на основе предложенного нового принципа, в различных режимах их работы, максимально приближенных к реальным, а также натурные эксперименты, проведенные с использованием автономных подводных роботов, полностью подтвердили несомненные преимущества нового принципа управления различными сложными многосвязными нелинейными ДО с существенно переменными и неизвестными параметрами. При этом высокая динамическая точность управления даже на предельно высоких скоростях движения исследуемых ДО достигалась с помощью простых в реализации и дешевых технических средств. Значительного увеличения указанной точности удалось достигнуть именно за счет введения виртуальных траекторий перемещения программных точек, относительно которых ДО двигался с большой динамической ошибкой (ввиду использования простой и легко реализуемой

следящей системы), но точно по предписанной траектории, а также за счет управления скоростями перемещения этих точек. То есть управление программными входными сигналами, подаваемыми на соответствующие входы ДО и автоматически учитывающими их возможные насыщения, а также изменения скоростей движения этих ДО позволяют точно и быстро перемещать их по предписанным траекториям. Некоторые важные перспективы использования нового принципа управления более детально описаны в работе [2].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Б.Н. Теория автоматического управления. М.: Наука, 1983. 429 с. (Избр. труды; т. 1).
2. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Анализ перспективных задач подводных роботов и методов синтеза систем управления их движением // Освоение морских глубин. М.: Оружие и технологии, 2018. С. 283–291.
3. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 47–54.
4. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш., Щербатюк А.Ф., Туфанов И.Е. Новый метод контурного управления движением АНПА // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 8. С. 46–56.
5. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш., Щербатюк А.Ф., Туфанов И.Е. Новый подход к синтезу высокоточных систем управления движением автономного подводного аппарата по сложным пространственным траекториям: материалы 7-й Рос. конф. «Управление в морских и аэрокосмических системах», Санкт-Петербург, 7–9 окт. 2014 г. СПб., 2014. С. 27–36.
6. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве. Владивосток: Дальнаука, 2016. 400 с.
7. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Мурсалимов Э.Ш., Щербатюк А.Ф., Туфанов И.Е. Синтез и исследование системы контурного управления движением подводного аппарата // Тр. XII Всерос. совещ. по проблемам управления. М., 2014. С. 3338–3350.
8. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю. Синтез системы автоматического формирования программных сигналов движения многозвенного манипулятора // Материалы 7-й науч.-техн. конф. «Мехатроника, автоматизация, управление». СПб., 2010. С. 404–407.
9. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Синтез системы автоматического формирования программных сигналов управления движением подводного аппарата по сложным пространственным траекториям // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 99–107.
10. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Способ формирования программного управления скоростным режимом движения подводных аппаратов по произвольным пространственным траекториям с заданной динамической точностью // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2011. № 4. С. 167–176.
11. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. New strategy of designing tracking control systems for dynamical objects with variable parameters // Mechatronics, automation, control. 2018. Vol. 19, N 7. P. 435–441.
12. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Mursalimov E.Sh., Scherbatyuk A.F., Tuphanov I.E. Some marine trial results of a new method for AUV trajectory motion control // Proc. of 2014 Oceans – St. John's, NL, Canada: IEEE, 2014. P. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS.2014.7003191.
13. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Synthesis method of control system for spatial motion of autonomous underwater vehicle // Int. J. Ind. Eng. Manag. 2012. Vol. 3, N 3. P. 133–141.
14. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Synthesis of automatic system for correction of program signal of underwater vehicle's movement on spatial trajectory // Proc. Int. conf. on control, automation and systems. Gyeonggi-do, Rep. Korea, 2010. P. 1745–1750. DOI: 10.1109/ICCAS.2010.5669794.
15. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Konoplin A.Yu. Synthesis of system for automatic formation of multilink manipulator velocity // Proc. of the 2<sup>nd</sup> RSI/ISM Int. conf. on robotics and mechatronics. Teheran, Iran, 2014. P. 785–790.
16. Filaretov V.F., Yukhimets D.A. Synthesis of the system for automatic formation of underwater vehicle's program velocity // Proc. of 8<sup>th</sup> Int. conf. on informatics in control, automation and robotics. Noordwijkerhout, Netherlands, 2011. Vol. 2. P. 439–444.
17. Filaretov V.F., Yukhimets D. The synthesis of AUV high-precision path following control system on the base of PD-controller // Proc. of IEEE Int. conf. on computer, control, informatics and its applications. Jakarta, Indonesia, 2016. P. 131–136.
18. Vukobratović K.M., Stokić M.D. Scientific fundamentals of robotics. Control of manipulation robots: theory and application. Berlin: Springer-Verlag, 1982. 366 p.
19. Wiener N. Cybernetics or control and communication in the animal and the machine. N.Y.; Paris: Technol. Press and John Wiley & Sons, Inc.; Hermann et Cie, 1948. 194 p.