

Острецов Г.Э.
Клячко Л.М.

**Методы
автоматизации
управления
движением корабля**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 629.01.451

ББК 39.475

О 76

Острецов Г.Э., Клячко Л.М. **Методы автоматизации управления движением корабля.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 120 с. — ISBN 978-5-9221-1138-6.

Монография — итог десятилетних совместных исследований авторов в области автоматизации управления движением судов с начала прошлого века до настоящего времени.

Приведены методы исследования и проектирования различных систем автоматического управления движением кораблей России и ряда иностранных государств. Широко представлены оригинальные законы автоматического управления движением кораблей в специальных режимах эксплуатации.

Для специалистов в области управления подвижными объектами.

Рецензенты:

д.т.н., профессор Дорри М. Х.

д.т.н., профессор Подоплекин Ю.Ф.

Научное издание

ОСТРЕЦОВ Генрих Эразмович

КЛЯЧКО Лев Михайлович

**МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ
КОРАБЛЯ**

Редактор *С.А. Тюрина*

Оригинал-макет: *А.В. Федотова*

Оформление переплета: *Н.В. Гришина*

Подписано в печать 23.10.09. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 7,5. Уч.-изд. л. 8. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»

МАИК «Наука/Интерпериодика»

117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90

E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;

http://www.fml.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ООО «Чебоксарская типография № 1»
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15

ISBN 978-5-9221-1138-6



9 785922 111386

ISBN 978-5-9221-1138-6

© ФИЗМАТЛИТ, 2009

© Г. Э. Острецов, Л. М. Клячко, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Авторулевые	6
1.1. Первые попытки автоматизации управления движением судна	6
1.2. Автоматическое управление движением малого корабля (пропорциональное П управление)	9
1.3. Авторулевые с пропорционально-дифференциальным (ПД) законом управления	12
1.4. Адаптивные системы управления движением (с использованием оценок фазовых координат, прогноза состояния и диагностики)	22
Глава 2. Комплексные (интегрированные) САУД.	28
2.1. Комплексные АСУ для стабилизации буровых судов	29
2.2. Интегральные (комплексные) системы управления.	32
Глава 3. Применение инструментальных сред для исследования, проектирования, отладки и контроля САУД, а также обучения и представления информации оператору	39
3.1. Система моделирования Dlogic v.2.0	40
3.2. Система расчета динамических систем ИПУ РАН	48
3.3. SCADA-системы (тренажеры Мурманского государственного технического университета)	49
Глава 4. САУД ЦНИИ «Аврора», ЦНИИ «Курс», ЦНИИ «Электроприбор» и НПОА им. академика Н. А. Семихатова.	53
4.1. Системы управления маневрированием (СУМ)	53
4.2. Комплексная система управления интерцепторами и приводами Арнесона для скоростного катера типа «Соболь».	54
4.3. Противоаварийное автоматизированное управление движением скоростных катеров	57

4.4. САУД для речных судов	58
Глава 5. Интеллектуальные законы управления движением судна	63
5.1. Автоматическое управление движением судна по заданному маршруту	63
5.2. Подсистема автоматического расхождения судна с встречным объектом.	66
5.3. Подсистема швартовки судна	72
5.4. Подсистема автоматической швартовки судна по заданному маршруту	75
5.5. Система автоматической швартовки судна с прогнозом.	80
5.6. САУД для корабля, подверженного сильным фиксированным (заранее известным) возмущениям.	89
5.7. САУД для корабля, подверженного сильным случайным возмущениям	91
5.8. САУД с программным управлением, переходящим на координатное управление с обратной связью	93
5.9. САУД с логической уставкой перехода через 0° – 360° (движение при курсовых углах, близких к 0° или к 360°)	96
5.10. САУД с избыточным объемом оценок измерений.	97
5.11. Система управления движением корабля (при развитом морском волнении).	99
5.12. Метод ускоренного автоматического всплытия корабля.	101
5.13. Управление движением судна с корректировкой тяги	105
5.14. Методы построения отказобезопасных систем управления движением корабля	108
5.15. Отказобезопасная система управления движением корабля	110
Заключение	113
Список литературы	115

Предисловие

Автоматизация управления движением корабля — достаточно узкий раздел техники, который появился в начале прошлого века. В настоящее время, как нам кажется, он достиг совершенства. Хотя уже в начале семидесятых годов прошлого столетия один из ведущих специалистов этого направления в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова заявлял: «Что надо было сделать в этом разделе техники, я уже все сделал, а что не сделал, то это и не нужно», мы считаем, что такое заявление весьма спорно! Однако недалек тот день, когда человеко-машинные системы управления движением корабля станут высоконадежными и полностью автоматизированными с минимальным (только командным) участием человека.

В книге показано развитие и совершенствование различных систем автоматического управления движением (САУД) корабля от момента зарождения идей в начале прошлого столетия и до настоящего времени, включая методы автоматизации исследований и построения законов управления движением корабля, особенности проектирования, отладки и контроля, а также обучения и представления информации судоводителю с использованием современных инструментальных сред.

Анализ этапов развития автоматизации управления движением корабля проведен в исторической последовательности, обращено внимание на суть научно-технических решений, а также рассмотрено воздействие на прогресс в данном направлении не только специалистов — разработчиков и эксплуатационников, но и других лиц, чье влияние вызывало ускорение или, наоборот, замедление развития технического прогресса в данном направлении.

Приводится обзор конкретных систем, которые были разработаны СКБ завода им. Н.С. Хрущева, заводом им. Кулакова, ЦНИИ «Полус», ЦНИИ «Аврора», ЦНИИ «Курс», НПО «Автоматика» им. академика Н.А. Семихатова, и комплексных систем автоматического управления движением судна различных иностранных фирм.

Книга отражает результаты многолетних исследований авторов и написана совместно, а раздел 4.4.1 и глава 5 — Л.М. Клячко.

Следует иметь в виду, что некоторые высказывания о становлении и развитии данного раздела техники отражают личный взгляд авторов.

Глава 1

АВТОРУЛЕВЫЕ

1.1. Первые попытки автоматизации управления движением судна

Управление движением корабля требует от судоводителя не только подготовленности, но и большого искусства. Для пояснения рассмотрим динамические характеристики автоматизируемого объекта. На рис. 1.1 приведены графики набора угловой скорости ω танкера «Али

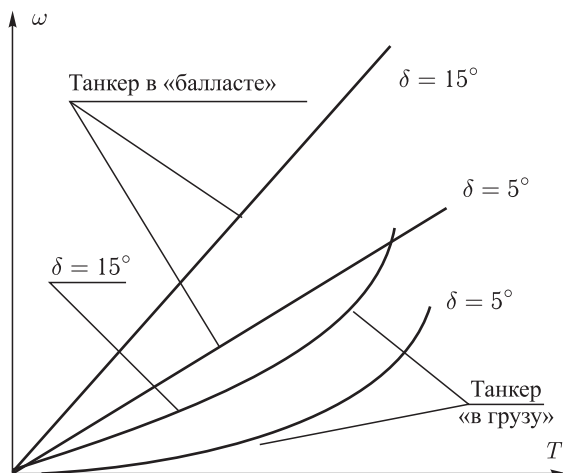


Рис. 1.1. Набор угловой скорости ω танкером «Али Байрамов» при постоянном угле перекладки руля $\delta = 5^\circ$ и $\delta = 15^\circ$ в двух режимах загрузки

Байрамов» при различных фиксированных углах перекладки руля δ в двух режимах плавания. Как следует из графиков, в «балласте» (судно не груженное) — это *устойчивое* инерционное звено с *большой* постоянной времени, «в грузу» — *неустойчивое* инерционное звено с существенно *большой* постоянной времени. Управление движением таким морским судном сложно и требует непрерывного внимания, потому что:

- инерционность объекта переменна (от 10 с до 1,5 мин);
- большое количество судов и кораблей по курсу неустойчиво;

- параметры математической модели углового движения корабля в процессе рейса переменны и зависят от скорости хода, глубины под килем, угла дифферента, загрузки и многих других факторов;
- расхождение со встречными объектами и кораблями требует большого искусства.

Автоматическое управление кораблями военно-морского флота (ВМФ) накладывает ряд дополнительных ограничений при выполнении боевых задач, особенно во время пространственного движения корабля, так как при этом проявляются сильные воздействия маневра корабля в горизонтальной плоскости на его фазовое состояние в вертикальной плоскости.

Длительное и эффективное ручное управление движением корабля весьма утомительно и может быть выполнено не каждым рулевым, потому что требует от человека:

- обладания «от природы» способностью зрительно оценивать величину текущей угловой скорости судна, в функции от которой и осуществляется управление;
- непрерывного внимания к текущему курсу судна и окружающей обстановке.

Стремление автоматизировать процесс управления движением судна появилось с давних времен, но стало возможным только после появления гирокомпасов и надежной технологической базы для построения авторулевого (а/р).

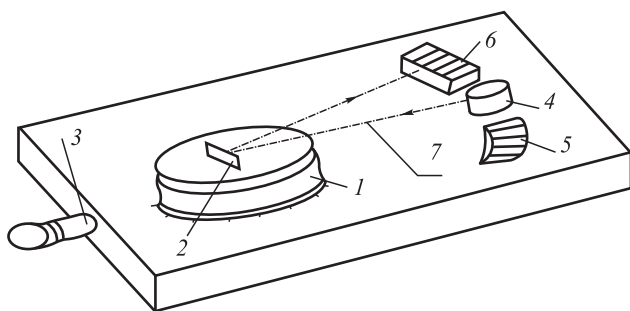


Рис. 1.2. Авторулевой с оптической системой измерения. 1 — магнитный компас; 2 — зеркальце, закрепленное на картушке компаса; 3 — поворотное основание оптической системы авторулевого; 4 — электролампа; 5, 6 — две группы фотоэлементов; 7 — направление хода оптического луча.

Первые попытки автоматизировать процесс движения появились в начале XX века. На рис. 1.2 приведен авторулевой, в котором источником информации о направлении движения судна является магнитный компас (1). Подвижная магнитная система компаса дополнена зеркальцем (2). Угол поворота подвижной магнитной системы компаса соответствует отклонению судна от заданного курса. Световой луч (7)

источника света (4), отражаясь от зеркальца (2), поступает в блок светочувствительных элементов (5, 6), что приводит к их срабатыванию и отклонению руля на угол, пропорциональный отклонению судна от заданного курса. Изменение курса судоводителем осуществлялось путем поворота рукояткой (3) всей платформы авторулевого. Данное автоматическое управление было предложено в 1921 году А.И. Мускарком [1.1], аналогичные предложения приведены в литературе и патентах [1.2, 1.3, 1.4, 1.5]. В качестве датчика направления движения вместо магнитного компаса в [1.6] было предложено использовать жирокоп.

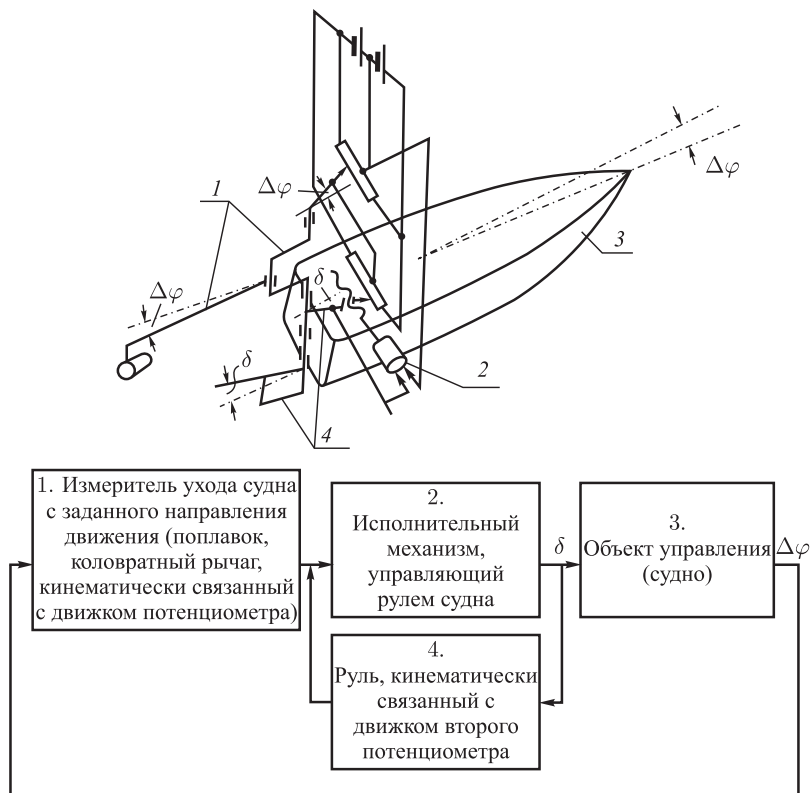


Рис. 1.3. Стабилизация направления движения судна с пропорциональным П законом управления.

На схеме

$\Delta\varphi$ — отклонение судна от прежнего курса,

δ — угол отклонения руля.

Несколько раньше С.А. Ковганкиным [1.7] (см. рис. 1.3) было предложено в качестве датчика «спрямления направления движения судна»

использовать устройство в виде штанги с поплавком на конце, второй конец которой связан с кормой судна через коловратный рычаг (1). При отклонении судна от прямолинейного направления движения пропорционально углу отклонения судна отклоняется штанга, а, следовательно, и коловратный рычаг, связанный с движком потенциометра. Электрический сигнал, пропорциональный этому отклонению, поступит на вход исполнительного механизма (2), что приведет к отклонению руля (4) и движка второго потенциометра на угол, пропорциональный отклонению руля. Это обеспечит возврат судна к прежнему (близкому к прежнему) направлению движения.

Рассмотренные решения (как это стало ясно позже) могли быть использованы только на катерах ВМФ и малых судах. В этом случае формировалось пропорциональное П управление, использование которого допустимо только для легких судов, устойчивых на курсе, и катеров с малой постоянной времени ($T < 10$ с). Процесс автоматизации этого направления тормозило отсутствие качественных измерителей курса судна и угла перекаладки руля.

1.2. Автоматическое управление движением малого корабля (пропорциональное П управление)

Перед Второй мировой войной появилась важная для ВМФ проблема автоматического управления автономным движением *малого* корабля (торпедного катера-мишени). Техническое решение стало возможным благодаря появлению более совершенного измерителя курса — гирокомпаса — и датчиков преобразования углового поворота вала в электрический сигнал. Создание такой малонадежной, но полностью автоматизированной системы управления движением катера-мишени значительно опередило свое время!

К тому времени уже появились единичные авторулевые (а/р «Угорь»), которые очень робко использовались на малотоннажных судах. Появление гирокомпаса — более совершенного измерителя угла курса судна и датчиков-сельсинов для преобразования углового поворота вала руля в электрический сигнал с достаточной надежностью позволило принять на вооружение удовлетворительно работающий а/р «Янтарь» с пропорциональным П законом управления:

$$\delta = K \cdot \Delta\varphi, \quad (1.1)$$

где

δ — отклонение руля,

K — коэффициент усиления,

$\Delta\varphi = (\varphi_{\text{текущее}} - \varphi_{\text{заданное}})$ — угол рыскания корабля по курсу.

Авторулевые типа «Янтарь» (а/р «Зубатка» и другие) эффективно использовались для управления движением малых судов и катеров ВМФ и разрабатывались в СССР до середины XX века. Аналогичные

авторулевые появились и во всем мире. В это же время в авиации появились автопилоты с П законом управления.

При линейном П законе управления замкнутая система автоматического управления движением по курсу даже на среднетоннажном судне не имела области устойчивого состояния (при любых коэффициентах усиления К в законе (1.1) судно входило в установившееся колебательное движение относительно заданного значения курса с амплитудой колебаний около двух градусов). Эксплуатировать такие авторулевые на крупнотоннажных судах было невозможно.

Некоторые особенности а/р с П законом управления приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1
Характеристики авторулевых с П законом управления (выпуск до 1950г)

Тип авторулевого	Год выпуска	Конструкт. особенности	Точность	Примечание
«Электроприбор» СССР	1930–1932	релейный	1,5°–2°	изготовлен в 2-х экз.
«Угорь» СССР	1936–1940	релейный	1°–5°	для ВМФ единич.
«Янтарь» СССР	1940–1941	релейный	1°–5°	для катеров
«Зубатка» СССР	1950	релейный	2°–4°	для катеров
«Сперри МК-2» США	1945–1947	релейный	1°–4°	П управление с «механ. люфта»
«Аншютц SST» Германия	1950	релейный	0,5°–3°	П управление с «механ. люфта»

Было замечено, что установка а/р с П законом управления на среднетоннажное судно (с постоянной времени > 10 с) и с «плохой» штатной рулевой машиной (когда заданное значение угла перекладки руля выполнялось неоднозначно из-за люфта — некоторого мертвого хода), позволила устранить автоколебания судна относительно заданного значения угла курса, т.е. судно автоматически двигалось по заданному направлению *без автоколебаний* с точностью стабилизации около одного градуса курса. Таким образом, «случайно» (благодаря наблюдательности разработчиков, подобно «случайному» изобретению Эдисоном электрической лампы, когда, совершенствуя лампу накаливания, Эдисон держал лампу за впаянный в стекло лампы металлический стержень, а второй рукой задел за положительный провод батареи и почувствовал электрический ток...) было найдено техническое решение, позволившее автоматизировать процесс стабилизации движения среднетоннажных и даже крупных судов.

Фирмы «Сперри» (США) [1.8] и «Аншютц» (Германия) [1.9] вскоре после второй мировой войны начали серийный выпуск а/р (см. рис. 1.4 — принципиальная электромеханическая схема а/р и рис. 1.5 — структурная схема а/р) с П законом управления, дополненным нелинейным звеном (4) (искусственно вводимым люфтом в цепи сигнала обратной связи по углу перекладки руля)

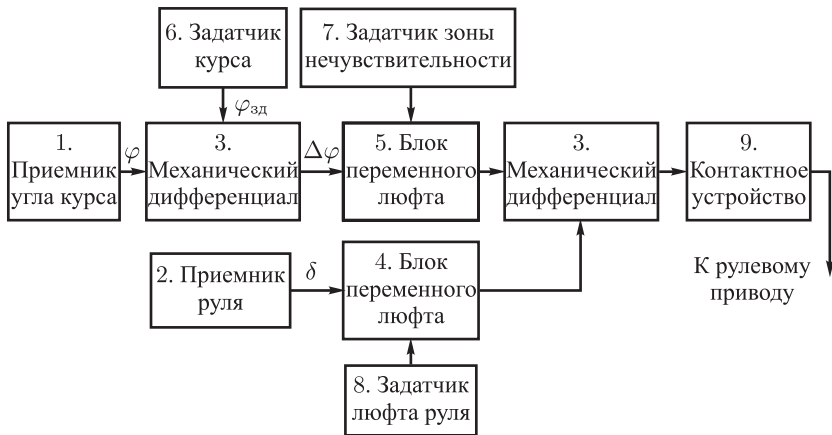


Рис. 1.4. Принципиальная электро-механическая схема авторулевого фирм «Сперри», «Аншютц»

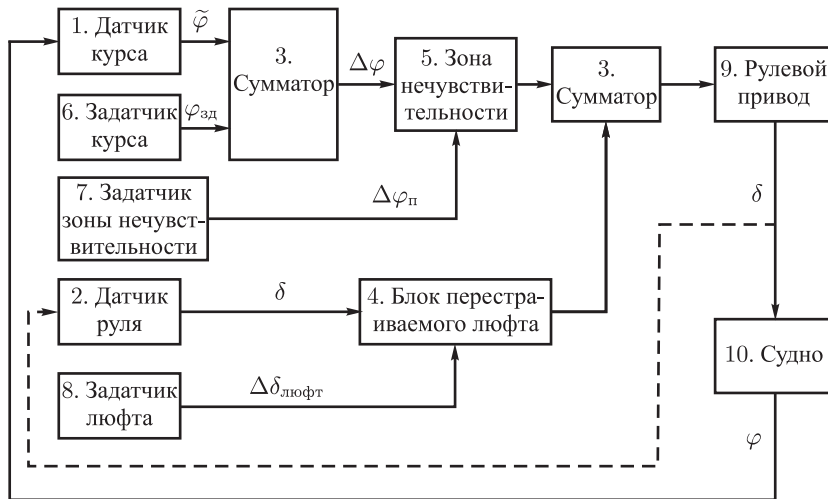


Рис. 1.5. Структурная схема авторулевого с мертвым ходом в цепи руля

и зоной нечувствительности (5) по сигналу рассогласования по курсу. Величины люфта и зоны нечувствительности устанавливались судоводителем рукоятками (8) и (7) перед выходом из порта в зависимости от состояния погоды и загрузки судна: «в грузу» — люфт больше, «в балласте» — люфт меньше, состояние погоды на море спокойное — величина зоны нечувствительности (5) должна быть равна нулю, шторм — величина зоны нечувствительности максимальная. Величины люфта и зоны нечувствительности могли перестраиваться в процессе рейса при изменении условий плавания, что позволяло приближать качество автоматической стабилизации к ручному управлению опытным руле-

вым. С развитием теории регулирования стало ясно, что люфт в цепи обратной связи по углу перекладки руля — это грубый аналог сигнала угловой скорости судна. Несколько позднее в авиации в автопилотах отказались от П закона управления и перешли к пропорционально-дифференциальному ПД закону (сигнал угловой скорости вырабатывался датчиком угловой скорости судна (ДУСом)).

Интересно заметить, что судоводители воспринимали а/р с осторожностью и настаивали на сохранении также чисто ручного управления, так например, а/р «Янтарь» и «Зубатка» являются дополнением к штатному — ручному управлению торпедным катером.

1.3. Авторулевые с пропорционально-дифференциальным (ПД) законом управления

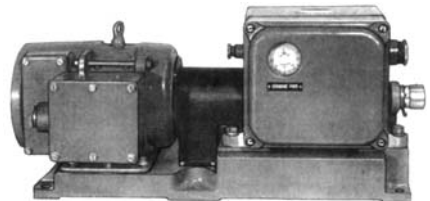
Широкое распространение авторулевых и их крупносерийное производство стало возможным только с развитием теории регулирования, в частности, методов проектирования ПД регуляторов, и, что очень важно, с появлением надежных аналоговых счетно-решающих элементов [1.10–1.38].

Надежные аналоговые элементы — это магнитные и полупроводниковые операционные усилители, электромеханические датчики угловой скорости (ДУС) и бесконтактные измерители угла — сельсины и вращающиеся трансформаторы. Следует заметить, что уже к середине второй мировой войны в ракетной технике Германии для автономного управления движением ФАУ-2 стали использовать автопилоты с ПД законом управления [1.30].

1.3.1. САУД пятидесятых годов прошлого столетия. Авторулевые начали крупносерийно выпускаться в СССР с середины пятидесятых годов прошлого столетия:



Пульт управления



Привод с редуктором

Рис. 1.6. Внешний вид а/р «Самшит» с рулевым приводом