

Новое поколение адаптивных авторулевых

Внедрение на морских и речных судах систем автоматического управления движением судна по курсу увеличивает скорость доставки грузов, что позволяет сократить оборотные средства, заключенные в грузах на время транспортировки; увеличить провозную способность судна за счет увеличения его валовой эксплуатационной скорости, а также снизить эксплуатационные расходы путем снижения энергетических потерь и сокращения численности экипажа. Опыт эксплуатации авторулевых показал, что при автоматическом управлении движением судна снижаются потери ходового времени судна на 2–3 %, что дает реальный эффект в виде экономии топлива до 5–6 %, а также создает предпосылки для ускорения грузооборотности судов.

Первые попытки автоматизации рулевого устройства судна относятся к прошлому столетию. Так, в 1892 году в Германии был выдан патент на автоматическое рулевое устройство, работающее от магнитного компаса. Первый практически пригодный для эксплуатации на судах электромеханический авторулевой был разработан фирмой “Аншютц” (Германия) вслед за созданием морского гироскопического компаса и запатентован в 1921 году. Конструкция и схема этого авторулевого оказались настолько удачными, что он используется на судах до настоящего времени практически без изменений. Затем авторулевые (в то время их называли гирорулевыми) стали выпускать фирмы АЕГ (Германия), “Сперри” (США), “Браун” (Англия), предприятие “Электроприбор” (СССР) и др. В настоящее время большинство технически развитых стран мира серийно выпускают авторулевые, работающие как от гироскопических, так и от магнитных датчиков курса. Эти системы спроектированы с учетом установки их на судах различных типов, начиная от прогулочных катеров до самых крупных пассажирских лайнеров и супертанкеров.

Однако системы автоматического управления движением судна с простейшими законами управления не являлись совершенными. В начале 1970-х годов начались интенсивные работы по созданию новых, более эффективных систем. Это было связано с резким ростом цен на топливо для судовых силовых установок, необходимостью повышения безопасности мореплавания в условиях интенсивного судоходства, а также строительством крупнотоннажных и скоростных судов, автоматическое управление которыми при использовании авторулевых с традиционным законом управления не обеспечивается или осуществляется неудовлетворительно.

Одним из основных направлений решения этой проблемы являлось создание автономных адаптивных авторулевых. Адаптивные авторулевые обеспечивают оптимальную в определенном смысле настройку параметров системы без участия человека-оператора при изменении состояния объекта управления и внешних условий плавания (скорости хода, осадки судна, состояния погоды, глубины под килем). В зависимости от реализуемых принципов адаптации (параметрическая адаптация с настройкой коэффициентов ПИД-регулятора, адаптация с параметрической идентификацией объекта в реальном времени, адаптация с эталонной моделью, прямая компенсация возмущающих воздействий и др.) различают несколько типов адаптивных авторулевых.

Адаптивные авторулевые первого типа характеризуются частичной автоматической настройкой параметров системы. Они используют различные косвенные критерии оценки качества работы системы, не всегда имеющие достаточное математическое обоснование. К ним относятся, например, адаптивные авторулевые типа TS (ПНР), ASAP-II (Швеция) и др. Эти схемы, как правило, не обеспечивают полной оптимизации системы автоматизированного управления (САУ) движением судна по курсу в различных условиях плавания.

Ко второму типу можно отнести авторулевые, осуществляющие автоматическую адаптацию системы с использованием эталонной математической модели (ММ) объекта или всей системы управления в целом. В этих авторулевых формирование сигналов, воздействующих на параметры управления, осуществляется на основе анализа качества удержания судна на курсе по наблюдаемым и моделируемым переменным состояниям. Существенной особенностью этих систем является наличие математической модели судна. Возможны различные способы использования эталонной математической модели в системе. Эталонная модель может соответствовать полной замкнутой САУ или только объекту управления. Типичным представителем этой группы является адаптивный авторулевой «Ракал-Декка» DP – 780» (Англия).

К третьему типу адаптивных авторулевых относятся самонастраивающиеся системы, определяющие оптимальные значения параметров настройки непосредственно по заданному, математически обоснованному, критерию качества. Таким критерием обычно служит функционал, обеспечивающий минимум потерь полезной мощности судовой силовой установки

при управлении и, как следствие, минимум расхода топлива на единицу пройденного расстояния. В состав авторулевого входит специализированная цифровая ЭВМ морского исполнения с набором вычислительных программ, в которую поступает информация от судового гирокомпаса, лага, гироскопического измерителя угловой скорости поворота судна, маятникового кренометра, измеряющего период бортовой качки, а также передаются значения заданного и истинного углов перекаладки руля. Существуют адаптивные авторулевые, использующие априорную информацию о динамике работы САУ движением судна по курсу в различных условиях плавания.

Наборы параметров управления, рассчитанные с помощью универсальной ЦВМ по специальной программе, хранятся в блоке памяти судового микрокомпьютера в виде матрицы и подбираются в зависимости от скорости хода судна, полосы пропускания частот системы и результатов минимизации критерия качества в замкнутой системе. К этой группе адаптивных авторулевых можно отнести системы “Сперри гиропайлот ASM” и “Диджилайлот AP-9” американских фирм “Сперри” и “Айотрон” и др.

Опыт и анализ эксплуатации вышеописанных адаптивных авторулевых и других, реализующих иные принципы адаптации, подтвердили их более высокую технико-экономическую эффективность по сравнению с традиционными авторулевыми. Но несмотря на полувековую историю развития, большое число публикаций, проблема адаптивного авторулевого, вероятно, до сих пор не имела практического решения на уровне современных требований. Настройка коэффициентов авторулевого или частичное изменение его структуры с помощью корректирующих элементов указанными способами осуществляется только на отдельных режимах его работы и не является в полной мере адекватной фактическим изменениям характеристик судна и внешних воздействий.

С появлением перспективного класса самоорганизующихся адаптивных систем положение изменяется. С одной стороны, ужесточились требования к современным системам управления как с точки зрения качества и точности регулирования на всех режимах работы объекта, так и круга решаемых задач. С другой стороны, появились новые возможности их обеспечения – разработаны методы современной прикладной теории управления и новая элементная база (программируемые контроллеры и одноплатные компьютеры).

Самоорганизующиеся системы предназначены для управления процессами в сложных объектах (нестационарных нелинейных со случайными внешними воздействиями), математические модели которых неизвестны. Принципиальное отличие этих систем управления от известных адаптивных систем состоит в том, что они построены на сочетании алгоритмов структурной (функциональной) адаптации с алгоритмами параметрической адаптации и оптимальностью. Самоорганизующиеся авторулевые отличаются от традиционных, которые, как правило, содержат только измерительные устройства и блок управления, наличием также

дополнительных блоков оптимального оценивания и идентификации.

Оптимальное управление любым объектом возможно лишь при оптимальной обработке информации. Эти функции – оптимальное оценивание состояния и идентификация параметров и характеристик объекта управления по экспериментальным данным реализуют указанные блоки. Оценивание состояний – это определение текущих значений таких переменных процесса, которые не могут быть измерены непосредственно или могут быть измерены лишь с большой погрешностью. Алгоритмы идентификации позволяют определять структуру модели судна и восстанавливать параметры этой модели. Варианты оптимальных самоорганизующихся авторулевых, которые по принципу действия относятся к системам с дискретным временем (цифровым или импульсным), разрабатываются научно-производственным объединением “Автоматизация машин и технологий”.

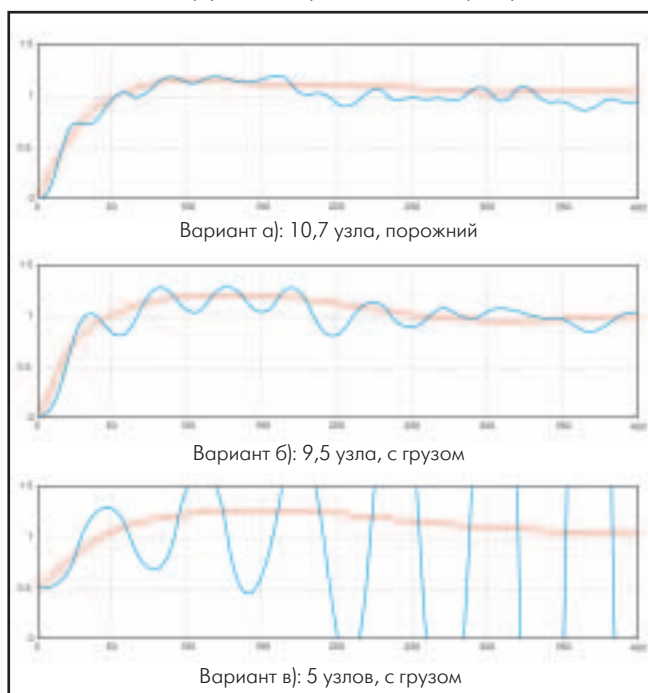
В таких системах непрерывное время разбивается на циклы. В течение цикла положение органа управления считается неизменным. Самоорганизация авторулевого осуществляется с помощью взаимосвязанных принятых алгоритмов оценки состояния системы, фильтрации входной информации, структурной и параметрической адаптации автоматически формируемой модели судна и, наконец, автоматически определяемых оптимальных управляющих воздействий. Такие авторулевые в полной мере отвечают современным требованиям. Они характеризуются следующими особенностями:

- ▶ высокое качество и точность управления на всех режимах работы судна, а также при их изменении обеспечиваются наличием одновременно алгоритмов структурной и параметрической адаптации, а также оптимального управления. Влияние факторов, связанных с изменением состояния и свойств судна, внешних условий, а также факторов, нарушающих заданные технологические процессы, компенсируется автоматически этими алгоритмами до пределов, отведенных управляющим воздействиям;
- ▶ для разработки и настройки авторулевого не требуется знание ММ судна, т.е. не требуется не только информация о параметрах, но и о структуре модели судна и внешних воздействиях;
- ▶ их использование исключает необходимость в тестовых специальных сигналах;
- ▶ информация о текущих и экстраполируемых нарушениях процессов управления может практически мгновенно передаваться на информационное поле оператора или (и) автоматы защиты. Блоки оценивания (наблюдатели) данных систем могут выпускаться и применяться отдельно в качестве прогнозаторов опасных режимов, выдающих сигналы на соответствующие дисплеи или устройства для дальнейшего использования. Это обстоятельство позволяет более эффективно реализовывать в самоорганизующемся авторулевым помимо функции регулирования еще и функции автоматического контроля, диагностирования, автоматической сигнализации и аварийной защиты;
- ▶ система с такими алгоритмами имеет возможность быстрой самоорганизации контуров управления в

условиях аварийных нештатных ситуаций. Эта возможность и поддержка операторов при принятии решений и их временная замена контуром автоматического управления системы могут играть очень важную роль в предотвращении аварий и катастроф;

▶ используемые алгоритмы обуславливают относительную простоту программного обеспечения системы, возможность ее микропроцессорной реализации на промышленных контроллерах.

Для сравнения особенностей оптимального самоорганизующегося авторулевого и авторулевого с ПИД-законом специалистами НПО "Автоматизация машин и технологий" было выполнено имитационное моделирование их работы применительно к судну с водоизмещением 6000 т. Коэффициенты математической модели судна были определены экспериментально для трех режимов: а) скорость 10,7 узла, порожний; б) скорость 9,5 узла, с грузом; в) скорость 5 узлов, с грузом. Сравнительный анализ авторулевых проводился в динамических и установившихся режимах их работы. Переходные процессы при ступенчатом воздействии в авторулевых приведены на рисунке.



Графики переходных процессов авторулевых:
– с ПИД-законом (синий);
– самоорганизующийся (красный).

Из кривых переходных процессов следует, что авторулевой с ПИД-законом (синий цвет) имеет для вариантов: а) – устойчивый переходный процесс, б) – колебательный, в) – расходящийся (неустойчивый). Для обеспечения работоспособности такого авторулевого требуется настройка коэффициентов ПИД-закона для вариантов б) и в), что и делается на практике. Самоорганизующийся авторулевой обеспечивает при всех вариантах скорости хода и загрузки судна требуемые показатели качества регулирования (красный цвет).

Помимо требования высокого качества в динамических режимах, как известно, к авторулевым предъявляется требование обеспечения определенной точности

в установившихся режимах (стабилизации и следящем). В таблице приведены графики типовых задающих воздействий в виде ступенчатой, линейной и квадратичной функций (оранжевый цвет), реакции статической и астатической систем на эти воздействия (синий цвет) и установившаяся ошибка $\Delta X_{уст}$, характеризующая точность работы системы. Статические системы имеют при ступенчатом воздействии установившуюся ошибку, которая называется статической, или ошибкой по положению. Она пропорциональна величине задающего воздействия и уменьшается с увеличением коэффициента передачи k разомкнутой системы. При изменяющихся во времени воздействиях ошибка непрерывно возрастает, ввиду чего эти системы в качестве следящих применять нецелесообразно. Наличие статической ошибки является характерным свойством статических систем.

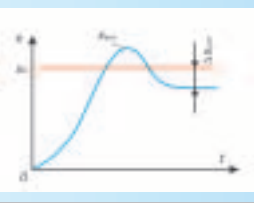
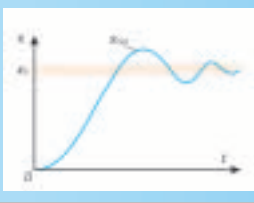
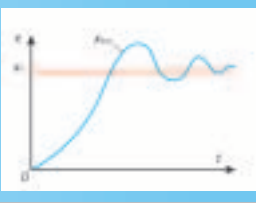
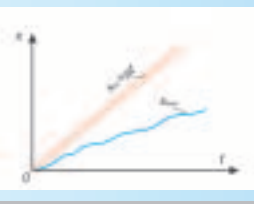
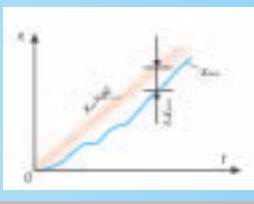
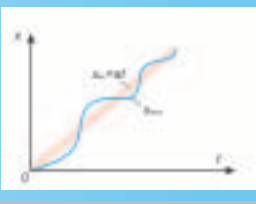
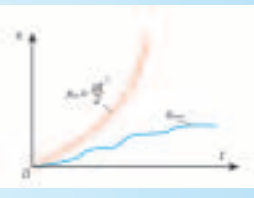
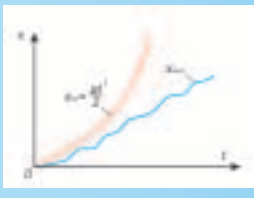
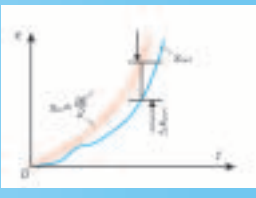
Астатические системы 1-го порядка ($\nu = 1$) принципиально точно обрабатывают ступенчатое воздействие, но имеют постоянную ошибку при обработке возрастающего сигнала. Эта ошибка пропорциональна скорости изменения входного сигнала, ввиду чего ее называют скоростной ошибкой, а коэффициент передачи разомкнутой системы – добротностью системы по скорости. Отсутствие статической ошибки объясняется наличием в структурной схеме интегрирующего звена.

Астатические системы 2-го порядка ($\nu = 2$) принципиально точно обрабатывают как ступенчатый сигнал, так и линейно возрастающий сигнал. При обработке квадратичного сигнала имеет место ошибка, пропорциональная ускорению входного сигнала и обратно пропорциональная коэффициенту передачи разомкнутой системы, который называется добротностью системы по ускорению, а сама ошибка – ошибкой системы по ускорению.

Астатические системы 3-го порядка ($\nu = 3$) принципиально точно обрабатывают как ступенчатый сигнал, линейно возрастающий сигнал, так и сигнал в виде квадратичной функции. Однако при обработке сигнала степенной функции с показателем степени 3 появляется ошибка. Учитывая сказанное, авторулевой с ПИД-законом обрабатывает без ошибки только ступенчатый задающий сигнал, в крайнем случае – ступенчатый и линейно возрастающий (в случае исполнительного механизма в виде интегрирующего звена). Задающие сигналы в виде линейно возрастающего сигнала (в первом случае) и в виде квадратичной функции (во втором случае) обрабатываются с определенной ошибкой, а другие сигналы – с ошибкой, стремящейся к бесконечности.

Самоорганизующийся авторулевой автоматически может обеспечивать астатизм от второго до седьмого порядка, что приводит к обработке с нулевой ошибкой задающих сигналов самого сложного вида, которые могут быть представлены в виде совокупности степенных функций. Эта особенность авторулевого имеет особое значение при исследовании и освоении минерально-сырьевых ресурсов океана, буксировке глубоководных аппаратов, прокладке трубопроводов и решении других подобных задач судном. Результаты моделирования показывают потенциальные возможности самоорганизующегося авторулевого и некоторые другие перспективные особенности, что позволяет его считать адаптивным авторулевым нового поколения.

Таблица. Установившиеся ошибки статических и астатических систем при типовых задающих воздействиях

Статическая система ($\nu = 0$)		Астатическая система			
		$\nu = 1$		$\nu = 2$	
Установившаяся ошибка	Реакция системы	Установившаяся ошибка	Реакция системы	Установившаяся ошибка	Реакция системы
$\Delta X_{уст} = \frac{x_0}{1+k}$		$\Delta X_{уст} = 0$		$\Delta X_{уст} = 0$	
$\Delta X_{уст} \rightarrow \infty$		$\Delta X_{уст} \rightarrow \frac{a}{k}$		$\Delta X_{уст} = 0$	
$\Delta X_{уст} \rightarrow \infty$		$\Delta X_{уст} \rightarrow \infty$		$\Delta X_{уст} \rightarrow \frac{a}{k}$	

Научно-производственное объединение “Автоматизация машин и технологий” предполагает поставлять самоорганизующиеся авторулевые на новые суда. Наряду с этим разрабатываются блоки настройки на принципах самоорганизации для модернизируемых авторулевых, программируемые контроллеры которых реализуют традиционные законы управления. Внедрение таких устройств не требует разработки математической модели судна, а также изменения конструкции

или программного их обеспечения, и, следовательно, сколько-нибудь значительных финансовых затрат. Самоорганизующиеся авторулевые обеспечивают значительное улучшение технико-экономических характеристик строящихся и модернизируемых судов.

Э. Б. Быков, к.т.н., ген. директор,
И. И. Туркин, д.т.н., проф., зам. ген. директора,
Л. В. Баскаков, к.т.н., доцент, нач. отдела, НПО “АМТ”



Научно–производственное объединение "АВТОМАТИЗАЦИЯ МАШИН И ТЕХНОЛОГИЙ"



15 лет

судостроение

нефтемашина

порты

энергетика

Системы
управления

Распред-
устройства

Пульты управления

НПО "АМТ"

196128, Санкт-Петербург, Благодатная ул., 6

Тел./факс: (812) 389-88-05, 389-01-79, 389-00-87

www.amtnpo.ru

e-mail: info@amtnpo.ru