

УДК 629.331

АДАПТИВНАЯ АБС

Я. Н. Нефедьев, д. т. н. / НПП «ЭСБА»

Как только какое-либо устройство становится объектом коммерческого производства, содержание публикаций о нём начинает носить характер рекламы и может заинтересовать лишь потенциальных потребителей. В данной статье хотелось бы отойти от этой тенденции и поделиться опытом создания антиблокировочной системы (АБС) тормозов, раскрыв некоторые особенности её построения. Возможно, это окажется полезным сегодняшним разработчикам, а также тем, кто захочет глубже понять, как функционирует эта система.

Для начала считаю важным показать, почему опыт автора заслуживает внимания, и привести некоторые результаты, демонстрирующие технический уровень разработки.

Качество АБС оценивается рядом параметров, а именно:

- тормозной эффективностью автотранспортного средства;
- устойчивостью автотранспортного средства при торможении;
- способностью адаптироваться к дорожному покрытию (оценивается по отсутствию блокирования колёс при продольной неравномерности покрытия);
- минимальной скоростью, до которой АБС не должна допускать длительного блокирования колёс;
- экономичностью расхода рабочего тела.

В табл. 1 приведены данные из официальных протоколов испытаний. Результаты оценки эффективности приведены для снаряжённой массы АТС (наихудший вариант).

Из таблицы видно, что показатели работы АБС значительно превышают нормативы, предписанные стандартами. Следует отметить, что испытания проведены с одним и тем же блоком управления без перестройки его характеристик, что демонстрирует инвариантность системы по отношению к объекту применения. Автор не располагает сведениями об АБС других производителей, в том числе признанных лидеров, таких как Bosch, WABCO, Knorr-Bremse, допускающих использование одного и того же блока управления на различных моделях АТС без перенастройки [1].

В табл. 2 приведены результаты испытаний различных АБС на одном и том же объекте — автобусе большой вместимости ПАЗ-5272.

Из таблицы видно, что наша система ЭСБА (НПП «Электронные системы безопасности автомобилей») по эффективности превосходит зарубежные аналоги.

Помимо приведённых характеристик для специалистов важен вид процессов регулирования колёс.

Таблица 1. Результаты испытаний АБС ЭСБА

АТС (схема АБС)	Оценка эффективности		Оценка экономичности	
	Коэффициент сцепления		Тормозной путь, м (замедление, м/с ²)	
	Высокий (0,598)	Низкий (0,123)	Полученные	Предписанные
ПАЗ-5272 (4s4m)	0,98	0,98	31,2 (5,4)	64,4 (2,5)
Урал-55571-30 (4s3m)	0,92	0,79	31,2 (2,4)	33,8 (2,2)
ЗИЛ-5301 (4s3m)	0,91	0,91	48,5 (3,8)	51,0 (2,2)

Таблица 2. Результаты испытаний АБС различных фирм

Коэффициент сцепления	Высокий		Низкий		Микст
	Гружённый	Снаряжённый	Гружённый	Снаряжённый	
Весовое состояние Фирма / № протокола					
ЭСБА (13-2/70-99)	0,97	0,98	0,90	0,98	0,309
WABCO (13-2/71-99)	0,86	0,89	0,88	0,83	0,308
Knorr-Bremse (13-2/63-99)	0,83	0,87	0,79	0,76	0,255

На рис. 1–3 приведены типовые графики, показывающие работу АБС в наиболее сложных режимах — при продольной и поперечной неравномерности сцепления.

Из рисунков видно, что АБС не допускает блокирования колёс практически до полной остановки автомобиля и обеспечивает адаптацию как при переходах с «хорошей» дороги на «плохую», так и в обратном направлении, а также при торможении на дороге с бортовой неравномерностью сцепления. Причём вид переходных процессов практически идентичен для существенно различных автотранспортных средств (ЗИЛ-5301 «Бычок», самосвал «Урал»).

Приведённые примеры достаточно убедительно свидетельствуют о высоком качестве АБС. Следует до-

бавить, что благодаря реализованной концепции построения адаптивной системы из цикла разработки были исключены этапы так называемых доводочных натуральных испытаний.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНОЙ АБС

Из-за наличия упругой эластичной оболочки (шины) автомобильное колесо как объект автоматического управления обладает существенными особенностями, главными из которых являются нелинейность коэффициента связи (сцепления) колеса с опорной поверхностью и нестационарность этого коэффициента как по величине,

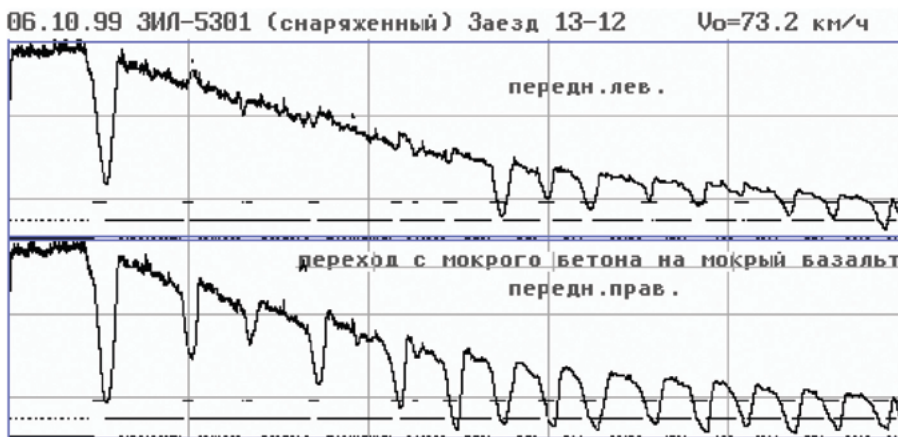


Рисунок 1. Переход с высокого сцепления на низкое



Рисунок 2. Переход с низкого сцепления на высокое

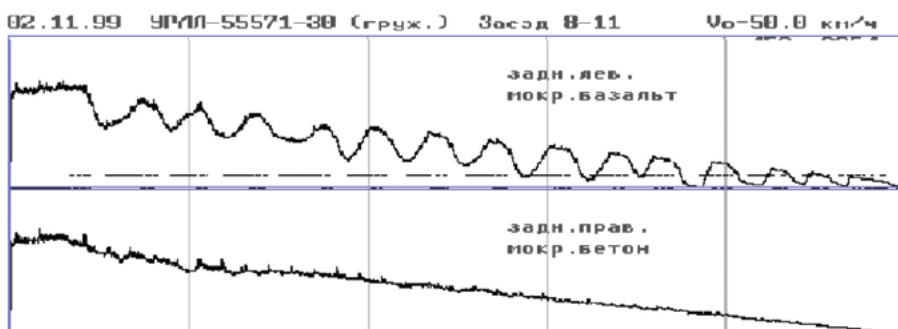


Рисунок 3. Торможение на покрытии МИКСТ

так и по знаку. Эта связь приблизительно описывается хорошо известной зависимостью от относительного скольжения колеса — так называемой φ - s -диаграммой.

Применение аналитических методов для синтеза системы управления автомобильным колесом проблематично, потому что объект управления в точке экстремума теряет устойчивость (по Ляпунову), то есть правее максимума управление в обычном смысле становится невозможным. Здесь задачей системы становится скорейший вывод изображающей точки из области неустойчивости, что достигается релейным воздействием определённой величины.

Суть предлагаемого метода синтеза системы заключается в иерархическом разделении её главных функциональных задач. Под этим понимается автономное решение задач поиска оптимума и формирование на его основе управляющей величины, а также задачи поддержания этой величины или слежения за ней, если она переменна. Таким образом удаётся отделить «медленную» задачу формирования (поиска) от «быстрой» задачи стабилизации. Плодотворность метода базируется на существенном различии временных характеристик контуров, реализующих управление собственно колесом («быстрый» контур) и поиск оптимума сцепных условий («медленный» контур).

Ниже сформулированы главные функциональные задачи антиблокировочной системы тормозов, каждая из которых решается в дальнейшем автономно. Разумеется, это не исключает ограничений, которые они могут накладывать друг на друга, а также не препятствует использованию в разных контурах одних и тех же элементов и блоков структуры.

ГЛАВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ АБС КАК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Первая главная функциональная задача АБС — формирование так называемого вектора управления, то есть такого вектора в пространстве состояний системы, стремление к которому обеспечивает достижение цели управления. Этот вектор должен соответствовать максимуму коэффициента продольной силы торможения.

Решение задачи формирования для АБС осложняется тем обстоятельством, что в процессе торможения автомобиля может меняться как величина максимума коэффициента сцепления (в восемь-десять раз), так и его положение по оси абсцисс (в относительном скольжении от 0,1 до 0,8). Таким образом, задача формирования непосредственно связана с задачей идентификации объекта управления, то есть определения его конкретных параметров для текущих условий. Без решения задачи идентификации или хотя бы определения характерных свойств его передаточной функции, дающих представление о достижимости цели управления, решение пер-

вой главной задачи — задачи формирования вектора управления — невозможно.

Второй главной функциональной задачей АБС следует считать обеспечение движения вектора (или рабочей точки), характеризующего состояние системы в фазовом пространстве её координат, к совпадению со сформированным вектором управления. Выполнение этой задачи — задачи воспроизведения, или стабилизации, — по сути и обеспечивает приближение свойств системы, в частности коэффициента продольного скольжения колеса, к оптимуму, определённому некоторым образом при решении задачи формирования.

В принципе, для построения системы автоматического управления достаточно решения двух сформулированных выше задач. Но при их физической реализации в процессе движения вектора состояния к вектору управления может произойти срыв управления: либо вследствие потери устойчивости (по Ляпунову), либо вследствие физической неосуществимости управления (например, из-за больших динамических нагрузок, создающих угрозу разрушения конструкции агрегатов автомобиля), что препятствует достижению цели управления. Для АБС учёт этих обстоятельств особенно важен, так как, во-первых, вектор управления из определения цели управления должен быть близким к границе устойчивости (точке, где характеристическое уравнение передаточной функции имеет нулевое решение), а во-вторых, при управлении имеется вероятность поломки элементов тормозного привода (уплотнений, сальников и т. п.), подвески, колёсных узлов, воспринимающих повышенные динамические нагрузки при циклической работе АБС. По тем или иным причинам в фазовом пространстве системы могут существовать области, попадание в которые недопустимо. Во избежание срыва управления следует предотвратить попадание в них вектора состояния системы.

Это достигается решением третьей главной функциональной задачи АБС, которую назовём задачей предотвращения критических состояний. В процессе управления может оказаться, что реализация третьей главной функциональной задачи наложит некоторые ограничения на вектор состояния, что не позволит достичь оптимальных свойств системы, например динамической точности (быстродействия). Это окупается исключением риска невыполнения задачи в целом.

АНАЛИЗ РАБОЧЕЙ ИНФОРМАЦИИ И ВЫБОР РЕГУЛИРУЕМОЙ КООРДИНАТЫ

С точки зрения цели управления объект полностью определён (с точностью до короткопериодических составляющих: шумов шин, подвески, дороги) φ - s -диаграммой. Однако ни одна из входящих в неё координат не может быть измерена. Необходимо найти достаточный для целей управления информационный эквивалент. В каче-

стве него представляется целесообразным определение лишь одной характерной точки переменного коэффициента передаточной функции объекта, а именно абсциссы его глобального максимума. Величина же максимума имеет второстепенное значение.

Анализ на экстремум уравнения, описывающего соотношение сил, действующих на колесо, и функции, описывающей поведение колеса, показал, что при условии стабилизации тормозного момента (что важно!) экстремум тормозной реакции и экстремум производной от частоты вращения колеса наступают при одном и том же значении аргумента. Из этого следует, что анализ на экстремум ускорения колеса при соблюдении постоянства тормозного момента (это возможно обеспечить) позволяет определить значение коэффициента продольного скольжения, которому соответствует максимум продольной силы колеса.

Вычисление ускорения колеса технически осуществимо, и его можно было бы принять в качестве рабочей информации об управляемом процессе. Однако эта координата не удовлетворяет главному требованию информативности, а именно однозначности задания рабочей точки, из-за существенной зависимости текущего ускорения колеса от многих параметров (дорожных условий, объёма тормозных камер, величины и распределения массы автомобиля и др.).

Единственной координатой, однозначно определяющей положение рабочей точки на фазовом портрете системы, является коэффициент продольного скольжения колеса, который представляет собой функцию двух измеряемых величин: частоты вращения колеса и скорости автомобиля. Технические трудности, связанные с прямым вычислением этого коэффициента (измерение скорости автотранспортного средства, выполнение операции деления), не будем принимать во внимание, так как имеются возможности его достаточно простой косвенной оценки. Следует также учесть, что скорость автотранспортного средства является медленно меняющейся величиной по сравнению с частотой вращения колеса и может считаться неизменной в течение переходного процесса (или цикла автоколебаний), характеризующего процесс управления колесом, из чего следует возможность выбора в качестве выходной координаты частоты вращения колеса, поддающейся непосредственному измерению.

ФОРМИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ВЕЛИЧИНЫ

Адаптивные системы не требуют полной начальной информации, но поиск наилучшего в определённом смысле функционирования системы требует времени, и тем большего, чем меньше объём начальной информации. Как правило, адаптивные системы построены на принципе добавления к основному контуру (в нашем случае контуру стабилизации) дополнительного конту-

ра, представляющего собой модель объекта, параметры которого подстраиваются в процессе управления, более или менее адекватно отражая действительные условия. С помощью подстраиваемой модели осуществляется идентификация системы или её отдельных звеньев. Под идентификацией в технической кибернетике понимают процедуру построения модели объекта по доступной для наблюдения информации о её входных и выходных сигналах. В нашем случае не требуется полного знания объекта, оказывается достаточным определить лишь одну характерную точку нелинейного коэффициента передачи (φ - s -диаграммы). Эта точка (значение коэффициента продольного скольжения, называемое критическим) находится с помощью анализа на максимум ускорения колеса путём фиксации в момент его возникновения (t_m) значений частоты вращения колеса (V_k) и скорости автотранспортного средства (V_a):

$$S_{kp} = 1 - [V_k(t_m) / V_a(t_m)]. \quad (1)$$

Скорость тормозимого колеса, соответствующая оптимальным условиям сцепления, составляет некоторую долю от скорости автомобиля:

$$V_k(t) = (1 - S_{kp}) \cdot V_a(t_m). \quad (2)$$

Подставив (1) в (2), получим выражение для заданной частоты вращения тормозимого колеса, соответствующей максимальному сцеплению с опорной поверхностью:

$$V_{зад} = [V_k(t_m) / V_a(t_m)] \cdot V_a(t). \quad (3)$$

Данная модель справедлива в интервале времени, для которого верно равенство (1). Имея в виду, что это равенство нарушается не только с изменением свойств опорной поверхности, но и с изменением угла увода управляемого колеса, с изменением скорости автотранспортного средства, остаётся открытым вопрос о необходимой частоте обновления информации, входящей в (3), то есть о рациональной частоте анализа характеристик объекта (поиска экстремума).

Большинство АБС представляют собой релейные системы, работающие в автоколебательном режиме, осуществляющие движение рабочей точки вокруг искомой точки максимума. Поэтому обновление информации об объекте с собственной частотой системы (0,3–0,5 сек.) представляется вполне достаточным для организации управления, близкого к оптимальному, на всём интервале торможения. Степень приближения формируемой ступенчатой функции, принимаемой в качестве заданной величины, подлежащей воспроизведению, к действительной оптимальной частоте вращения колеса определяется частотой автоколебаний (чем она выше, тем больше ступенек и тем меньше их величина) и динамикой торможения автомобиля. Следует иметь в виду, что такой метод формирования управляющей величины накладывает ограничения на качество системы стабилизации [2]. Её динамическая точность не должна быть слишком высокой, так как в этом случае «отработка» за-

данного значения частоты вращения колеса происходит быстрее, чем обновляются данные об объекте. В этом случае рабочая точка в своём движении не охватывает экстремума («сползает» влево по φ - s -диаграмме), что создаёт угрозу стабилизации постоянной частоты вращения колеса. Это по мере снижения скорости автомобиля приводит к снижению интенсивности торможения и в итоге к полному его растормаживанию. Границы применения метода отражает соотношение

$$(\Delta V_{\kappa} / T_{\text{ак}}) j_a \cdot (1 - S_{\text{кр}}), \quad (4)$$

где ΔV_{κ} , $T_{\text{ак}}$ — амплитуда и период автоколебаний по частоте вращения колеса; j_a — замедление автомобиля.

Смягчение и даже полное устранение ограничений (4) может быть достигнуто путём получения достоверной информации о скорости самого транспортного средства. Практика отвергла получение такой информации с помощью специальных измерителей: «пятого» (нетормозимого) колеса, доплеровских датчиков и даже акселерометров с последующим интегрированием сигнала. В современных АБС используют лишь косвенные методы определения скорости автомобиля, от точности которых в наибольшей степени зависит качество управления тормозимым колесом и надёжность с точки зрения предотвращения растормаживания автомобиля. Эта часть алгоритма является наиболее охраняемым ноу-хау разработчиков АБС и не публикуется в открытой печати. Ниже мы раскроем один из возможных методов, как показано выше, обеспечивающих достаточную инвариантность системы как к внешним условиям, так и к объекту применения.

ПОСТРОЕНИЕ КОНТУРА СТАБИЛИЗАЦИИ

Назначение данного контура состоит в обеспечении движения тормозимого колеса с заданной частотой вращения, то есть его следует интерпретировать как следящую систему. Предполагая быстродействие контура стабилизации достаточно высоким (за время переходного процесса входная величина изменяется несущественно), рассмотрим его, пользуясь методом «замороженных» коэффициентов. По сути, это лишь немного упрощает задачу синтеза, позволяя сосредоточиться на вопросах, связанных с особенностями АБС. Если при решении задачи формирования нас интересовала в основном абсцисса φ - s -диаграммы, то в задаче стабилизации существенной является её ордината.

Условно разбив φ - s -диаграмму на три участка, в которых её наклон, характеризуемый коэффициентом K_s , имеет разный знак, упрощённую передаточную функцию колеса можно представить в виде

$$\begin{aligned} & -K / (Tp + 1) \text{ при } K_s > 0; \\ W(p) = & \{-K / Tp \text{ при } K_s = 0; \\ & -K / (Tp - 1) \text{ при } K_s < 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где видно, что передаточная функция объекта в зависимости от положения рабочей точки описывает три различные структуры: апериодическое звено, интегральное звено и неустойчивое апериодическое звено, то есть объект обладает свойством переменности структуры. Роль переключающего элемента выполняет нелинейное звено, описывающее связь колеса с опорной поверхностью. Это свойство объекта нетривиально.

Вторая особенность объекта, упоминавшаяся ранее, — нестабильность коэффициента передачи, что вызывает трудности в обеспечении необходимого качества переходного процесса во всём диапазоне его изменения, то есть обеспечение инвариантности системы к коэффициенту передачи.

Третья особенность объекта — зависимость его параметров, в том числе постоянной времени, от скорости транспортного средства. Данное обстоятельство означает, что с уменьшением скорости автомобиля инерционность объекта снижается и при постоянстве параметров тормозного привода должен наступить такой момент, когда управление станет невозможным и система потеряет устойчивость. Для различных структур объекта, определяемых положением рабочей точки, эти моменты не совпадают. Тем не менее существует некоторый объективный предел минимальной скорости автомобиля, ниже которого работа АБС при заданных параметрах тормозного привода теоретически невозможна.

До настоящего времени автору не встречалась литература, содержащая описание объекта, сочетающего в себе столько неприятностей одновременно. Тем более что неизвестны строгие аналитические методы синтеза систем управления такими объектами. Если добавить к этому, что исполнительные устройства АБС, так называемые модуляторы давления, относятся к релейным устройствам и обладают, помимо инерционности, чистым запаздыванием, то следует констатировать, что синтез управления здесь является скорее искусством, чем наукой.

Среди различных принципов управления, позволяющих в том или ином смысле наилучшим образом управлять объектом регулирования, наибольший интерес вызывают системы, в которых управляющие воздействия являются разрывными функциями координат и внешних факторов. В таких системах удаётся получить максимальный эффект. Здесь задача синтеза сводится к выбору поверхностей в фазовом пространстве, на которых функция управления претерпевает разрывы, обеспечивающие специфический вид движения, называемый «скользящим режимом» [3]. Суть такого движения состоит в том, что изображающая точка в зависимости от начальных условий движется по траектории, принадлежащей одной из линейных структур, до пересечения с упомянутой поверхностью. После попадания на эту поверхность изображающая точка не может её покинуть, так как лю-

бое отклонение от поверхности переключения переводит её на траекторию такой структуры, которая вновь возвращает её назад. Движение происходит в колебательном режиме, параметры которого (частота и амплитуда) зависят от неидеальности элементов системы. Самое важное, что после попадания рабочей точки на поверхность переключения переходный процесс в системе определяется не свойствами линейных структур, а зависит лишь от вида поверхности переключения. Таким образом, удаётся придать системе совершенно новые свойства, которые не в состоянии обеспечить ни одна из образующих её постоянных структур. Только такой подход позволяет найти выход из, казалось бы, тупиковых ситуаций и обеспечить приемлемое качество АБС в условиях дефицита информации о её координатах.

Однако корректная реализация АБС в классе систем с переменной структурой также оказывается невозможной, поскольку для организации «скользящего режима» необходимы исполнительные устройства, реагирующие не только на знак ошибки управления, но и на её величину. Сложность конструкции таких устройств, их цена и, главное, повышенный расход рабочего тела при их работе препятствуют применению на практике. Для построения АБС оказалось возможным обойти эту проблему путём программирования постоянной времени тормозного привода. При удачно выбранной программе характер протекания процессов в системе близок к «скользящему». По сути здесь сохраняется принцип управления структурой (знаком обратной связи), а величина воздействия, которая должна быть пропорциональна величине ошибки, имеет постоянное значение, но в зависимости от ошибки ставится скорость привода. Такие системы по качеству значительно превосходят обычные релейные системы. Назовём их системами с квазипеременной структурой.

ЗАДАЧА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ

Надёжность АБС как системы, непосредственно связанной с безопасностью автомобиля, является одной из важнейших её характеристик. При этом с точки зрения последствий отказа АБС совершенно безразлична его причина: вызван ли он разрушением элементов системы или связей между ними, срывом управления из-за потери устойчивости (по Ляпунову) или воздействием помех на каналы передачи информации. Последние две причины наиболее характерны для сложных систем автоматического управления, и их предотвращение, собственно, и является основой структуры рассматриваемой подсистемы. Её конкретные функции включают в себя:

- удержание координат АБС в пределах границ допустимых областей;
- подавление ложных команд и помех в информационных каналах;

- резервирование отдельных цепей, программных блоков или основных контуров.

Вытекающие из этих функций технические средства могут быть весьма разнообразны: от простейших схемотехнических и программных решений до построения специальных резервных контуров, обладающих сложными передаточными функциями и собственной динамикой.

Напомним, что АБС при всей её сложности является лишь подсистемой предотвращения в иерархической структуре тормозного привода, который, в свою очередь, представляет собой только одну из подсистем в структуре управления автотранспортным средством.

Не вдаваясь в подробности синтеза контура предотвращения, заметим, что главнейшая его функция — недопущение растормаживания автомобиля при любом отказе АБС, включая её механическое повреждение.

С учётом последнего вопросы самодиагностики АБС, несмотря на самостоятельность этого направления в построении надёжных систем, целесообразно отнести к функции предотвращения критических состояний.

В заключение данного раздела нужно заметить, что изложенные подходы к синтезу АБС оправдали себя, позволив создать в отрыве от конкретного автотранспортного средства унифицированный комплект системы. Указанный комплект прошёл успешную апробацию как в аналоговой, так и в микропроцессорной интерпретации в составе автомобилей ЗИЛ, КамАЗ, КрАЗ, МАЗ, автобусов ЛАЗ, полуприцепов и прицепов практически без проведения лабораторно-дорожных исследований [4].

Поскольку изложенный материал стал плодом многолетней деятельности автора, представляется уместным выразить благодарность сотрудникам, с которыми он имел честь работать над проблемами повышения безопасности конструкции автомобилей. В первую очередь коллективу, некогда существовавшему в НИИ автоприборов (ныне ФГУП «Автоэлектроника»), а также персоналу автополигона, с неизменной доброжелательностью предоставлявшему возможность для испытания образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Нефедьев Я. Н. Российская АБС: качество и проблемы / Я. Н. Нефедьев, Э. Н. Никульников, В. И. Сальников // Автомобильная промышленность. — 2001. — № 5. — С. 32–35.
2. Нефедьев Я. Н. Корректируемый задатчик скорости тормозного колеса транспортного средства: а. с. 553142; БИ № 13. — 1977.
3. Емельянов С. В. Системы автоматического управления с переменной структурой. — М.: Наука, 1967. — 336 с.
4. Нефедьев Я. Н. АБС: эффективность, проблемы и решения // Мир авионики. — 2003. — № 2.