

ходному числу Рейнольдса (около 19000) определяется турбулентным,

$$St = St_{0,лам} = 0,22 / (Re_h^{**} Pr^{1,33}).$$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в условиях больших температурных напоров  $\sim 900$  К при пуске энергетической установки происходит ламинаризация ТПС, которую необходимо учитывать в расчетах тепловой нагрузки поверхностей теплообмена.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Володин Ю. Г., Федоров К. С., Яковлев М. В. Коэффициент трения в пусковом режиме энергетической установки // Известия вузов. Машиностроение. — 2006. — № 8. — С. 37—40.
2. Ф а ф у р и н А. В. Законы трения и теплоотдачи в турбулентном пограничном слое // Тепло- и массообмен в двигателях летательных аппаратов. Казань, Казанский авиационный ин-т. — 1979. — Вып. 2. — С. 62—69.
3. К у т а т е л а д з е С. С., Л е о н т ь е в А. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 320 с.

621.436

## УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

*Д-р техн. наук, проф. В.А. МАРКОВ, инж. Е.Ф. ПОЗДНЯКОВ, асп. М.И. ШЛЕНОВ*

*Рассмотрены требования к системам автоматического регулирования частоты вращения дизельных двигателей. Разработан регулятор для дизель-генераторной установки, включающий последовательные корректирующие звенья. Проведены исследования дизель-электрического агрегата с регуляторами различных типов.*

*Requirements to systems of a rotational speed auto control applied to diesel drives are considered. The regulator for a diesel-generator drive which is powering up sequential correcting links is developed. Researches of a diesel-electric drive with regulators of different types are carried out.*

Одним из наиболее важных параметров дизельных двигателей (далее дизелей), применяемых в дизель-генераторных установках (ДГУ), является частота вращения коленчатого вала. В электроагрегатах, вырабатывающих переменный электрический ток, к частоте вращения дизеля предъявляются достаточно жесткие требования. Этим обеспечиваются требования нормативных документов (ГОСТ или ТУ) к частоте переменного тока. Поэтому очень важно точно поддерживать скоростной режим работы дизеля, независимо от внешних нагрузок на электроагрегат, для чего двигатели оснащаются системой автоматического регулирования (САР) частоты вращения. Но и наличие такой системы не всегда обеспечивает необходимые статические и динамические показатели двигателя.

Наиболее значимыми показателями динамических качеств дизеля являются продолжительность (время) переходного процесса  $t_{\text{п}}$  и заброс параметра (частоты вращения) в переходном процессе (перерегулирование)  $\sigma$  [1, 2]. Время переходного процесса  $t_{\text{п}}$  определяется быстродействием САР. Заброс параметра в переходном процессе характеризуется перерегулированием  $\sigma$ , определяемым в виде отношения максимального отклонения регулируемой величины к ее установившемуся значению.



В общих технических требованиях, предъявляемых к дизелям автотракторного и промышленного назначения, показатели динамических качеств обычно не регламентируются. Но существует ГОСТ по системам автоматического регулирования частоты вращения дизелей (ГОСТ 10511-83 и его последующие редакции), который предусматривает ограничение по времени переходного процесса и перерегулирования в зависимости от класса точности САР (табл. 1) [1,2]. Наиболее жесткие требования предъявляются к динамическим качествам дизельных двигателей ДГУ, относящихся к первому классу точности. Характерные переходные процессы этих двигателей — сбросы и набросы нагрузки. При полном сбросе нагрузки (от полной до холостого хода) наибольшее допустимое время регулирования составляет  $t_{\text{п}} = 2$  с при перерегулировании не более  $\sigma = 5\%$ . Эти требования накладывают на динамические качества дизеля определенные ограничения, что имеет существенное значение при разработке соответствующих САР.

Таблица 1

Показатели динамических качеств САР дизельных двигателей

Показатель	Класс точности САР			
	1	2	3	4
Перерегулирование $\sigma$ , %	5,0	7,5	10,0	15,0
Время переходного процесса $t_{\text{п}}$ , с	2	3	5	10

Известные САР дизелей реализуют различные принципы регулирования частоты вращения. В наиболее распространенных САР, работающих по принципу Ползунова—Уатга, осуществляется так называемое пропорциональное регулирование частоты вращения (П-регулирование) [2—4]. В этих САР регулирующее воздействие  $\mu(t)$  на регулирующий орган объекта (двигателя) является функцией динамической ошибки  $x(t)$ , определяемой в виде отклонения регулируемой величины  $y(t)$  от ее заданного значения  $g(t)$ , т. е.  $x(t) = g(t) - y(t)$ . Сигнал ошибки  $x(t)$  вырабатывается на сравнивающем элементе (сумматоре) 4 (рис. 1, а), на который поступают задающее воздействие  $g(t)$  и через линию 5 главной отрицательной обратной связи — регулируемый параметр  $y(t)$  (зачерненный сектор сумматора 4 означает смену знака сигнала  $y(t)$ ). В этом случае закон регулирования (зависимость между входной и выходной величинами регулятора) выражается зависимостью  $\mu(t) = kx(t)$ , где  $k$  — коэффициент усиления регулятора.

Применение П-регулирования не всегда позволяет достичь требуемых статических и динамических показателей САР. Поэтому используются и другие принципы регулирования. К ним относят и регулирование по возмущающему воздействию  $f(t)$  — по нагрузке на двигатель (Н-регулирование) [2—4]. При Н-регулировании, впервые предложенном французским ученым Понселе, регулирующее воздействие  $\mu(t)$  вырабатывается устройством компенсации 3 (Н-регулятором, рис. 1, б) в зависимости от возмущения  $f(t)$  в виде  $\mu(t) = kf(t)$  и подается на объект 1. В этом случае реализуется принцип компенсации возмущений [5—7]. Так как в САР, работающей по возмущению, отсутствует линия главной отрицательной обратной связи (ОС), то такая САР является разомкнутой. Регулятор Понселе измеряет непосредственно изменения нагрузки на двигатель, а не частоты вращения вала двигателя. Это позволяет создать астатическую САР (т. е. обеспечить нулевую статическую ошибку  $x_{\text{ст}} = 0$ ) и повысить ее быстродействие, так как изменения скоростного режима являются лишь следствием изменений нагрузки. Но такой регулятор не способен поддерживать заданный скоростной режим, так как причинами его нарушения могут быть не только изменения нагрузки. Поэтому регулирование по возмущению применяется



только в сочетании с регулированием по отклонению. При этом САР содержит П-регулятор 2 (рис. 1, а), Н-регулятор 3 и формирует два регулирующих импульса — по частоте вращения вала  $\mu_n$  и нагрузке на двигатель  $\mu_n$ , которые суммируются на сумматоре 6. При этом реализуется закон регулирования в виде  $\mu(t) = k_n x(t) + k_n f(t)$ . Регулятор становится двухимпульсным, а САР — комбинированной.

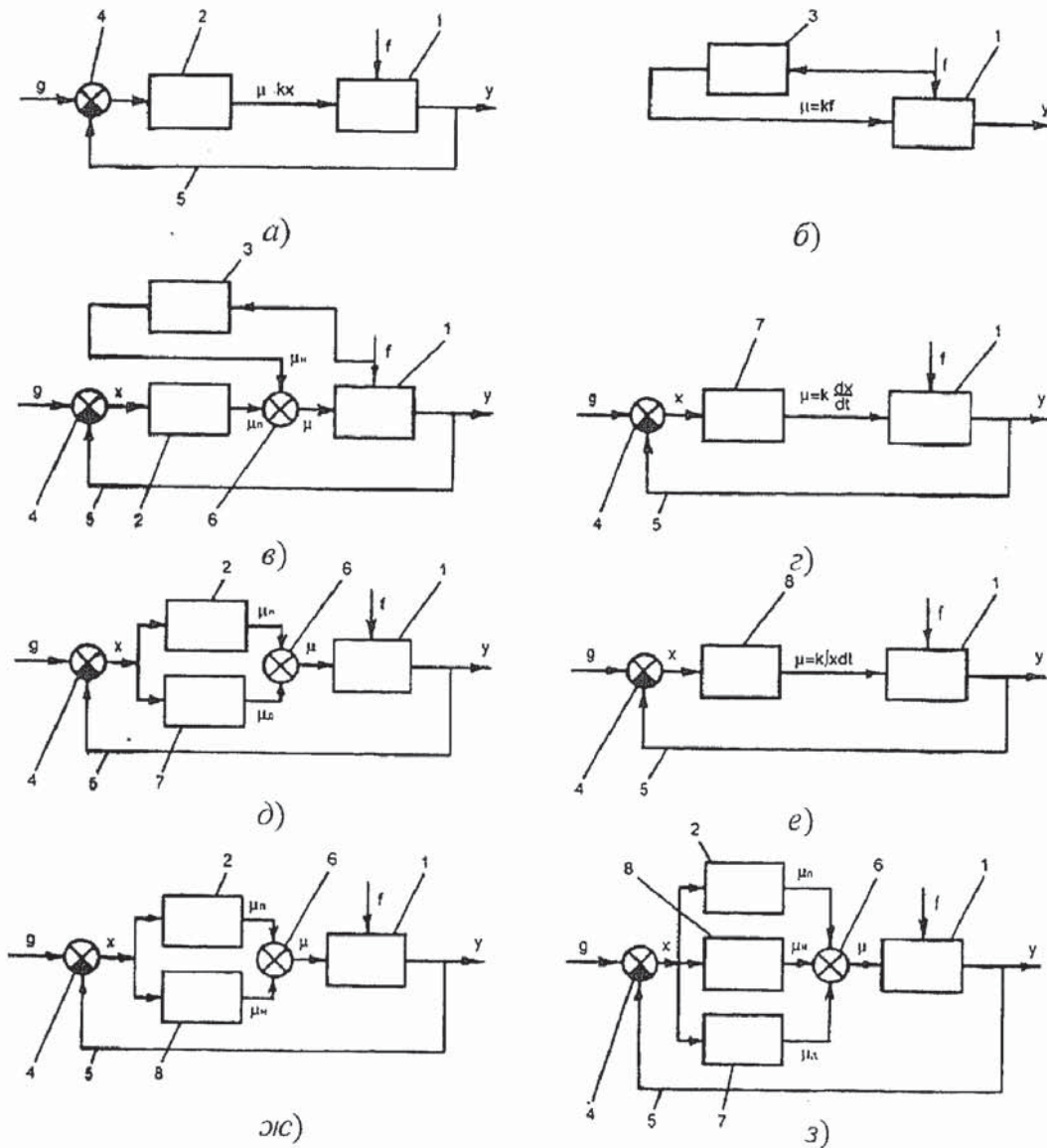


Рис. 1. Функциональные схемы САР с регулятором, работающим по отклонению (а), с регулятором, работающим по возмущению (б), с комбинированным регулятором по отклонению и возмущению (в), с Д-регулятором (г), с ПД-регулятором (д), с И-регулятором (е), с ПИ-регулятором (ж), с ПИД-регулятором (з); 1 — объект управления (дизельный двигатель); 2 — регулятор частоты вращения (П-регулятор); 3 — регулятор нагрузки (Н-регулятор); 4 — сравнивающий элемент (сумматор); 5 — линия главной отрицательной обратной связи; 6 — сумматор; 7 — Д-регулятор; 8 — И-регулятор

Значительное улучшение динамических качеств САР может быть достигнуто при дифференциальном (Д) принципе регулирования [5—7]. Закон Д-регулирования определяется в виде  $\mu(t) = k dx/dt$  (рис. 1, г). Таким образом, регулирующее воздействие  $\mu(t)$ , формируемое Д-регулятором 7, должно быть пропорционально не сигналу ошибки  $x(t)$ , а ее производной  $dx/dt$ . Такой регулятор, впервые предложенный братьями Сименс

(Германия), является дифференцирующим устройством и называется акселерометром. Он реагирует на скорость изменения регулируемого параметра — на угловое ускорение вала двигателя. Импульс углового ускорения может повысить быстродействие САР, так как в момент изменения нагрузки он более значителен, чем импульс отклонения частоты вращения вала. Но регулятор, реагирующий только на изменения углового ускорения, не способен поддерживать заданный скоростной режим, так как он не реагирует на изменения регулируемого параметра. Поэтому Д-регулятор 7 (рис. 1, *д*) применяется только в сочетании с П-регулятором 2. Такой комбинированный регулятор, вырабатывающий два регулирующих импульса — по частоте вращения  $\mu_n$  и по ускорению вала  $\mu_d$ , называется пропорционально-дифференциальным (ПД-регулятор) и формирует регулирующее воздействие в виде  $\mu(t) = k_n x(t) + k_d dx/dt$ . Это воздействие с сумматора *б* подается на вход объекта регулирования *l*.

Недостаток П- и Д-регуляторов — наличие статической ошибки  $x_{ст}$ . Повысить точность работы САР в установившихся режимах позволяет формирование интегрального (И) закона регулирования в виде  $\mu(t) = k \int x(t) dt$ , при котором  $\mu(t)$  зависит от накапливаемой во времени ошибки регулирования  $x(t)$  [5—7]. Интегрирование сигнала ошибки  $x(t)$  проводится И-регулятором 8 (рис. 1, *е*), позволяющим построить астатическую САР. Но этот регулятор, являющийся интегрирующим устройством, увеличивает склонность САР к колебаниям. Поэтому для обеспечения требуемого качества работы САР И-регулятор 8 (рис. 1, *жс*) применяется только в сочетании с П-регулятором 2. Такие комбинированные пропорционально-интегральные (ПИ) или изодромные регуляторы формируют закон регулирования в виде  $\mu(t) = k_n x(t) + k_n \int x(t) dt$ . Благодаря наличию интегральной составляющей  $\mu_n$  ПИ-регуляторы не имеют статической ошибки. Требуемые показатели качества работы САР на неустановившихся режимах обеспечиваются за счет пропорциональной составляющей  $\mu_n$  закона регулирования [1—3].

Динамические качества САР с ПИ-регулятором улучшаются при введении в закон регулирования дифференциальной составляющей  $\mu_d$ . Это приводит к формированию пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) закона в виде  $\mu(t) = k_n x(t) + k_n \int x(t) dt + k_d dx/dt$ . Этот закон поддерживается ПИД-регулятором, содержащим П, И, Д-регуляторы (позиции 2, 8, 7 на рис. 1, *з*). Такая работа САР обеспечивает существенное улучшение статических и динамических свойств САР.

Рассмотренные принципы регулирования наиболее просто реализуются при оснащении двигателя электронными регуляторами. Однако и их применение не всегда позволяет удовлетворить современные жесткие требования к статическим и динамическим свойствам САР. Это обстоятельство учитывалось при разработке САР частоты вращения для дизель-электрического генератора АД-40 на базе дизеля Д-246 (4 ЧН 11/12,5) с электронными регуляторами ЭР 1,5/4,5 и ЭР 0,25. Этими регуляторами оснащаются топливные насосы высокого давления (ТНВД) типа УТНМ производства Ногинского завода топливной аппаратуры (НЗТА). Причем, для привода дозирующего органа (рейки ТНВД) используется исполнительный механизм (ИМ) непрямого действия с электромеханическим преобразователем типа «сопло-заслонка». Принципиальная схема этого ИМ представлена на рис. 2, его компоновка на ТНВД — на рис. 3. Некоторые технические характеристики ИМ приведены в табл. 2.

При создании САР частоты вращения с указанными электронными регуляторами для дизель-электрического генератора АД-40 были проанализированы возможности использования описанных выше схем САР (рис. 1). Исследования динамических свойств ДГУ с регуляторами различных типов проводились с использованием математических моделей. Перед аналитическим исследованием были экспериментально получены логарифмические



амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ) дизеля Д-246 и электрогидравлического ИМ. Затем были разработаны математические модели дизеля и ИМ, уточнение которых проводилось путем сравнения ЛАЧХ и ЛФЧХ, снятых с реальных устройств, и соответствующих характеристик, полученных на моделях. Переходные процессы и частотные характеристики рассчитывались с использованием программы электронного моделирования ELECTRONICS WORKBENCH. При расчетах переходных процессов с разными типами электронных регуляторов использовались одни и те же модели дизеля и ИМ. При исследованиях сравнивались ЛАЧХ и ЛФЧХ регуляторов с различной структурой и переходные процессы дизеля с этими регуляторами. Было проведено сравнение характеристик ДГУ с ПИД-регулятором. Варьирование коэффициентами пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-закона регулирования позволило определить их оптимальные с точки зрения динамических качеств САУ, значения —  $k_n = 20$ ,  $k_i = 100$ ,  $k_d = 1$ . При этих значениях коэффициентов ПИД-закона регулирования получен переходный процесс наброса нагрузки со следующими показателями: время переходного процесса  $t_n = 1,5$  с, перерегулирование (заброс частоты вращения)  $\sigma = 3,8$  %, наклон регуляторной характеристики  $\delta = 0$  (астатический регулятор) (рис. 4). Аналогичные показатели для переходного процесса сброса нагрузки составили:  $t_n = 1,8$  с,  $\sigma = 3,9$  %.

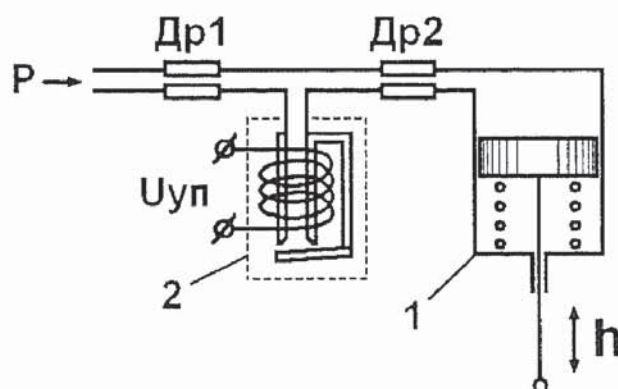


Рис. 2. Принципиальная схема электрогидравлического исполнительного механизма; 1 — поршневой гидравлический усилитель; 2 — электромеханический преобразователь типа «сопло-заслонка» с электромагнитным управлением;  $U_{уп}$  — управляющее напряжение от электронного блока регулятора;  $P$  — давление рабочей жидкости; ДР1 и ДР2 — дроссели;  $h$  — перемещение выходного штока регулятора

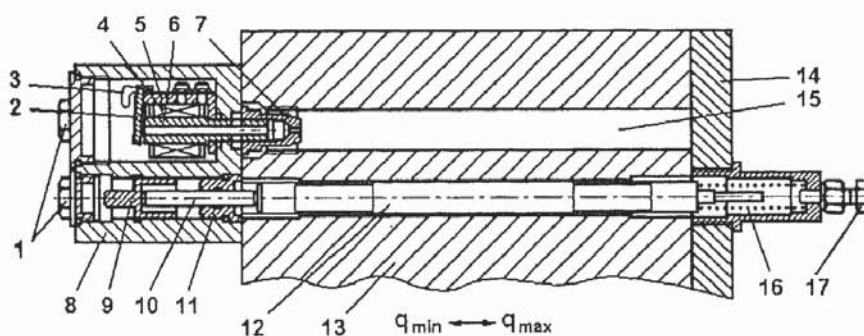


Рис. 3. Компонка электрогидравлического исполнительного механизма на ТНВД: 1 — заглушка; 2 — заслонка (якорь); 3 — пружина заслонки; 4 — магнитопровод; 5 — катушка; 6 — сопло; 7 — жиклер-гайка; 8 — корпус; 9 — поршень; 10 — выходной шток регулятора; 11 — втулка штока; 12 — рейка ТНВД; 13 — корпус ТНВД; 14 — плита крепления; 15 — канал низкого давления; 16 — возвратная пружина рейки; 17 — болт ограничения пусковой подачи;  $q_{max}$  и  $q_{min}$  — максимальная и минимальная подачи топлива



Таблица 2

Технические характеристики исполнительного механизма

Рабочее напряжение, В	24/12
Максимальный потребляемый ток, А	0,5/1,0
Рабочая жидкость	Дизельное топливо
Давление рабочей жидкости, МПа	0,3
Максимальный расход рабочей жидкости, л/мин	1,5
Диаметр поршня, мм	14
Максимальное усилие перемещения, Н	22
Время изменения подачи топлива от 0 до 100%, с	0,05-0,06

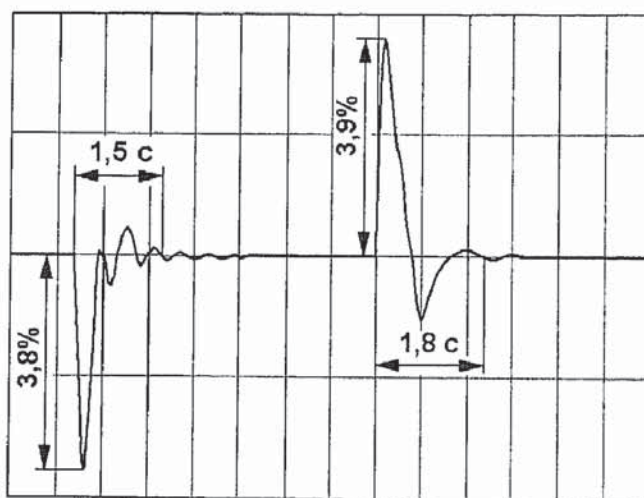


Рис. 4. Изменение частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя с ПИД-регулятором в переходных процессах наброса нагрузки на ДГУ (слева) и сброса нагрузки (справа)

Сравнение полученных динамических показателей ДГУ с ПИД-регулятором и приведенных в табл.1 требуемых динамических показателей САР первого класса точности показывает, что продолжительность переходного процесса сброса нагрузки  $t_n = 1,8$  с близка к предельно допустимой  $t_n = 2,0$  с. Сравнительно большим оказалось и перерегулирование:  $\sigma = 3,9$  % (предельное значение  $\sigma = 5,0$  %). Поэтому были рассмотрены другие возможности улучшения динамических показателей САР частоты вращения.

Одним из наиболее эффективных методов улучшения показателей качества САР является включение в структуру регулятора последовательных корректирующих устройств (звеньев) [5—7]. Наибольшее применение нашли пассивные электрические последовательные корректирующие устройства, представляющие собой звенья из R-, C- и L-элементов, не содержащие дополнительных источников электродвижущих сил. При разработке регуляторов были использованы форсирующее и интегро-дифференцирующее звенья.

Форсирующее (пассивное дифференцирующее) звено имеет электрическую схему, представленную на рис. 5, а, и передаточную функцию вида

$$W(p) = (T/\tau)(1 + \tau p)/(1 + Tp),$$

где  $\tau = R_1 C$ ;  $T = R_1 R_2 C / (R_1 + R_2)$ ;  $\tau > T$ .

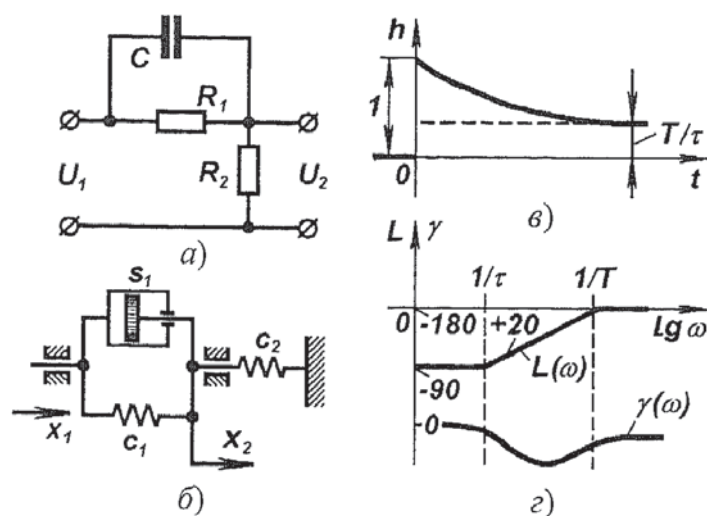


Рис. 5. Схемы и характеристики форсирующего звена: а — электрическая схема; б — механический аналог; в — переходная характеристика; з — логарифмические амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики;  $U_1, U_2$  — входное и выходное напряжения;  $C$  — конденсатор;  $R$  — сопротивление;  $X_1, X_2$  — входное и выходное перемещения;  $c$  — жесткость пружины;  $s$  — площадь гидропоршня;  $h$  — переходная функция;  $L$  — ЛАЧХ;  $\gamma$  — ЛФЧХ;  $\omega$  — частота;  $T, \tau$  — постоянные времени

Механическая аналогия форсирующего звена представлена на рис. 5, б. Переходная характеристика и логарифмические частотные характеристики форсирующего звена показаны на рис. 5, в, з. Название «форсирующее звено» связано с видом переходного процесса, который форсируется в своей начальной части (рис. 5, в).

Интегро-дифференцирующее (подавляющее или режекторное) звено является комбинацией замедляющего (пассивного интегрирующего) и форсирующего (пассивного дифференцирующего) звеньев. Это звено имеет электрическую схему, представленную на рис. 6, а, и передаточную функцию вида

$$W(p) = (1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p) / [(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)],$$

где  $\tau_1 = R_1 C_1$ ;  $\tau_2 = R_2 C_2$ ;  $T_1 T_2 = \tau_1 \tau_2$ ;  $T_1 + T_2 = \tau_1 + (1 + R_1/R_2) \tau_2$ .

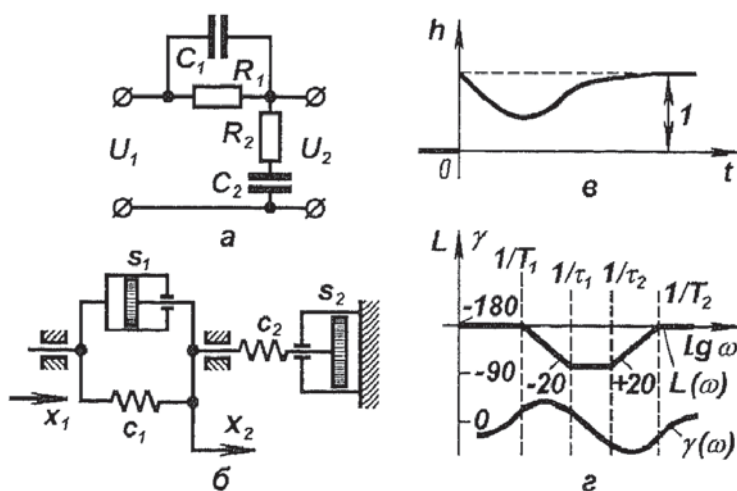


Рис. 6. Схемы и характеристики интегро-дифференцирующего звена: а — электрическая схема; б — механический аналог; в — переходная характеристика; з — логарифмические амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики



Механическая аналогия интегро-дифференцирующего звена представлена на рис. 6, б. Переходная характеристика и логарифмические частотные характеристики этого звена показаны на рис. 6, в, г. Одно из названий этого звена — «подавляющее звено» связано с видом ЛАЧХ, которая равна нулю в области малых частот и в области больших частот, на которых входной сигнал подавляется (рис. 6, г).

При разработке регулятора с последовательными корректирующими звеньями исходный П-регулятор с большим коэффициентом усиления  $k_n = 200$  был дополнен двумя последовательно включенными корректирующими звеньями — форсирующим и интегро-дифференцирующим. В этом случае функциональная схема электронной САР принимает вид рис. 7.

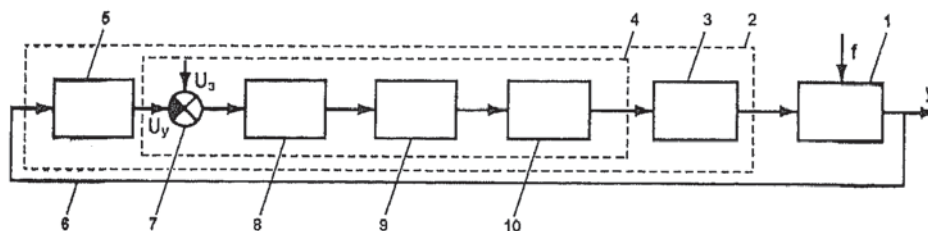


Рис. 7. Функциональная схема электронной САР с П-регулятором с корректирующими звеньями: 1 — объект управления (дизельный двигатель); 2 — регулятор частоты вращения; 3 — исполнительный механизм; 4 — электронный блок регулятора; 5 — датчик частоты вращения; 6 — линия главной отрицательной обратной связи; 7 — сравнивающий элемент (сумматор); 8 — П-регулятор; 9 — форсирующее корректирующее звено; 10 — интегро-дифференцирующее корректирующее звено

Таким образом, исследуемый пропорциональный регулятор содержит три последовательно соединенных звена: пропорциональное усилительное и два корректирующих звена — интегро-дифференцирующее и форсирующее (корректирующих звеньев может быть и более двух). Включение в структуру регулятора этих звеньев, имеющих логарифмические частотные характеристики (рис. 5, г и 6, г), позволяет «исправлять» ЛАЧХ и ЛФЧХ элементов САР за счет возможности изменения наклона логарифмической амплитудно-частотной характеристики в диапазоне от 0 до 60 дБ/дек (рис. 8). При этом наличие интегро-дифференцирующего звена позволило подавить экстремум ЛАЧХ в области средних частот (такой же экстремум ЛАЧХ имеет САР с ПИД-регулятором, рис. 8), а наличие форсирующего звена — продлить горизонтальный участок ЛАЧХ в области больших частот. Варьируя коэффициентами усиления корректирующих звеньев, удалось получить ЛАЧХ с наклоном 0 дБ/дек в широком диапазоне изменения частот входного сигнала.

Проведенные расчетные исследования показали, что при степени неравномерности регуляторной характеристики  $\delta = 0,5\%$  могут быть получены следующие показатели: время переходного процесса наброса нагрузки  $t_n = 0,3$  с, перерегулирование  $\sigma = 1,7\%$  (рис. 9). При наклоне регуляторной характеристики  $\delta = 3,0\%$  был получен переходный процесс без перерегулирования продолжительностью  $t_n = 0,25$  с (рис. 10).

С использованием результатов проведенных исследований были разработаны опытные образцы электронного регулятора с пропорциональным законом управления и корректирующими звеньями для ДГУ типа АД-40. Технические характеристики дизель-электрического генератора АД-40 с электронными регуляторами ЭР 1,5/4,5 и ЭР 0,25 приведены в табл. 3. На рис. 11 представлен общий вид электронного блока регулятора частоты вращения и датчика частоты вращения, а на рис. 12 — общий вид стенда для испытаний топливной аппаратуры с установленным на нем топливным насосом высокого давления с исполнительным механизмом регулятора частоты вращения. Осциллографирование переходных



процессов этого ДГУ подтвердило возможность достижения параметров, полученных расчетным путем.

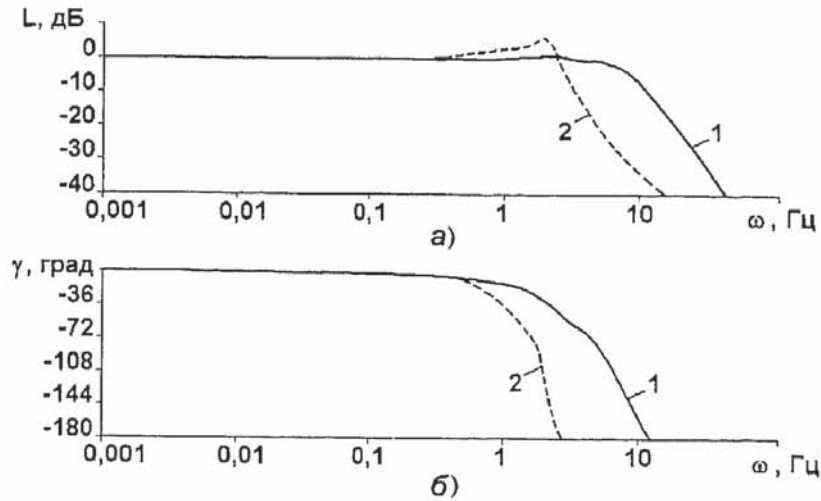


Рис. 8. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики (а) и логарифмические фазо-частотные характеристики (б) САР с регуляторами различных типов: 1 — с пропорциональным регулятором с корректирующими звеньями; 2 — с ПИД-регулятором

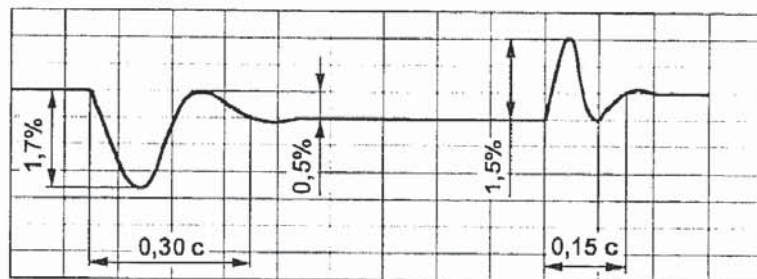


Рис. 9. Изменение частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя с П-регулятором с корректирующими звеньями в переходных процессах наброса нагрузки на ДГУ (слева) и сброса нагрузки (справа) при степени неравномерности регуляторной характеристики  $\delta = 0,5 \%$ .

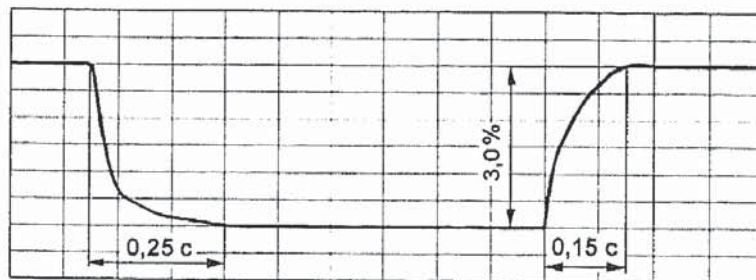


Рис. 10. Изменение частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя с П-регулятором с корректирующими звеньями в переходных процессах наброса нагрузки на ДГУ (слева) и сброса нагрузки (справа) при степени неравномерности регуляторной характеристики  $\delta = 3 \%$

Технические характеристики дизель-электрического генератора АД-40 с электронными регуляторами ЭР 1,5/4,5 и ЭР 0,25

	ЭР 1,5/4,5	ЭР 0,25	ГОСТ 10511-83
Номинальная частота вырабатываемого тока, Гц	50	50	—
Допустимый диапазон изменения номинальной частоты вырабатываемого тока	47-53 Гц	—	менее 5%
Степень неравномерности (наклон) регуляторной характеристики, %	1,5-4,5	0,25	2-4
Максимальный заброс частоты вращения при сбросе полной нагрузки, %	не более 3	не более 3	не более 5
Время переходного процесса при забросе частоты вращения, с	не более 0,5	не более 0,5	не более 2
Допустимая нестабильность частоты вращения, %	не более 0,2	не более 0,2	не более 0,6-0,8
Рабочий диапазон температур, °С	-40...+85	-40...+85	
Температурный коэффициент изменения номинальной частоты вращения, % / °С	0,01 / 1	0,01 / 1	

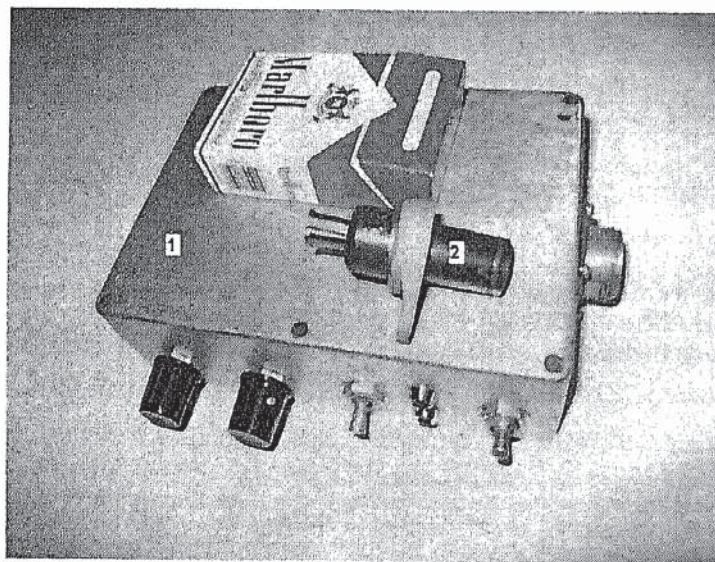


Рис. 11. Общий вид электронного блока регулятора частоты вращения (1) и датчика частоты вращения (2)

Резервом улучшения динамических показателей ДГУ с разработанным электронным регулятором является совершенствование ИМ регулятора. Штатный ИМ имеет постоянную времени  $T = 0,06$  с. Ее уменьшение до  $0,015...0,02$  с позволит получить следующие показатели: время переходного процесса  $t_n = 0,1 - 0,2$  с, перерегулирование  $\sigma = 0,5 - 0,8$  %, наклон регуляторной характеристики  $\delta = 0,2$  %, что соответствует требованиям промышленных электрических сетей.



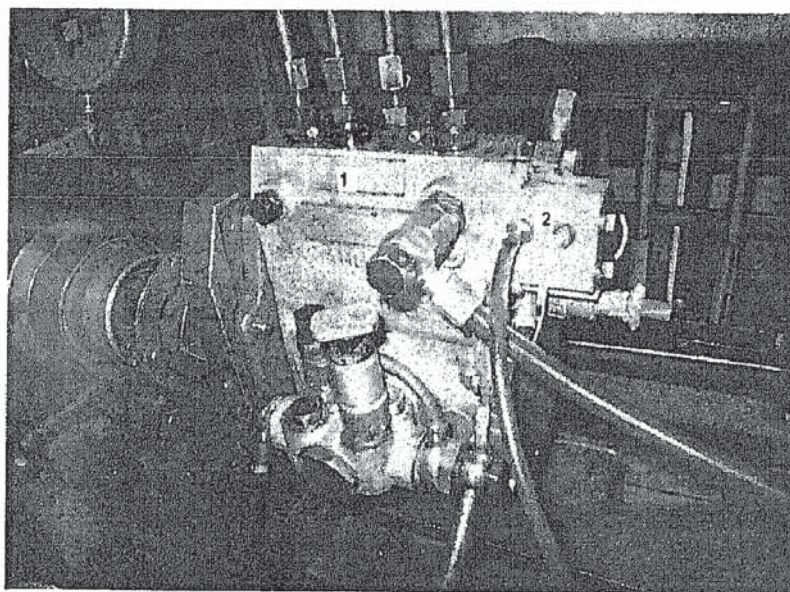


Рис. 12. Общий вид стенда для испытаний топливной аппаратуры с установленным на нем топливным насосом высокого давления (1) с исполнительным механизмом (2) регулятора частоты вращения

Проведенные расчетно-экспериментальные исследования подтвердили эффективность использования разработанного пропорционального регулятора частоты вращения с последовательными корректирующими звеньями в дизельных двигателях дизель-генераторных установок и возможность обеспечения динамических и статических показателей, соответствующих первому классу точности САР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 10511-83. Системы автоматического регулирования скорости (САРС) дизелей стационарных, судовых, тепловозных и промышленного назначения. — М.: Изд-во Стандартов, 1983. — 14 с.
2. Грехов Л. В., Иващенко Н. А., Марков В. А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей. — М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2005. — 344 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей / С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др. Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. — М.: Машиностроение, 1985. — 456 с.
4. Крутов В. И. Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания. — М.: Машиностроение, 1989. — 416 с.
5. Основы автоматического регулирования и управления / Л.И. Каргу, А.П. Литвинов, Л.Л. Майборода и др. Под ред. В.М. Пономарева, А.П. Литвинова. — М.: Высшая школа, 1974. — 439 с.
6. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. — М.: Наука, 1989. — 304 с.
7. Солодовников В. В., Плотников В. Н., Яковлев А. В. Теория автоматического управления техническими системами. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. — 492 с.