

Е. В. Кузнецов, канд. техн. наук, доц.

ГУ ВПО «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПЕРСПЕКТИВНАЯ СИСТЕМА ПОДАЧИ ТОПЛИВА ДИЗЕЛЯ

В статье проанализированы исследования двигателей для малогабаритной техники и систем питания дизелей, ведущиеся на кафедре строительных, дорожных и подъёмно-транспортных машин Белорусско-Российского университета, предложены направления совершенствования этих систем и механизмов. Представлена методика расчета параметров электронной системы ограничения подачи топлива системы питания дизелей.

Важное место в подготовке молодых инженеров по специальности «Подъёмно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование» принадлежит дисциплине «Тягово-транспортные машины». До 2011 г. эта наука называлась «Двигатели внутреннего сгорания и автотракторное оборудование». Целью преподавания является ознакомление студентов с конструкцией и основами теории двигателей и шасси самоходных машин. Преподавалась данная учебная дисциплина сначала доц. Агманки Э. Б., затем доц. Антипенко Г.Л. В настоящее время курс лекций читает доц. Кузнецов Е. В. На кафедре СДПТМиО имеется специализированная лаборатория и полигон со стендами, макетами, плакатами и действующей дорожно-строительной техникой. Освоены мультимедийные лекции с множеством учебных и научных фильмов.

Научная работа в рамках данной дисциплины ведётся по двум направлениям:

- разработка и исследование двигателей для малогабаритной техники;
- разработка и исследование систем питания дизелей.

Как известно, важнейшей частью системы питания является система подачи топлива. В дизелях самоходных машин применяют системы подачи топлива следующих типов:

- 1) неаккумуляторные, которые в свою очередь, делят на:
 - а) разделённого типа, где топливный насос высокого давления (ТНВД) и форсунки выполнены в виде отдельных узлов, связанных довольно длинными трубопроводами;
 - б) неразделённого типа, т. е. с насос-форсунками;
- 2) аккумуляторные.

Каждая из указанных систем имеет как достоинства, так и недостатки. Наиболее популярной в настоящее время является аккумуляторная система подачи топлива *Common-Rail*. Она имеет электромагнитные или пьезоэлектрические форсунки, управляемые электронным блоком. Это позволяет регулировать цикловую подачу топлива, используя большое количество информационных переменных, а также обеспечивать двух и трёхступенча-

тый впрыск, что уменьшает динамические нагрузки и улучшает экономические и экологические показатели. Однако данная система имеет и существенные недостатки:

1) большое количество прецизионных пар, что увеличивает стоимость;

2) низкий КПД системы по сравнению с другими из-за значительного расхода топлива, подаваемого на слив в процессе впрыска и поддержания постоянного давления в гидроаккумуляторе.

Традиционная для нашего отечества система разделённого типа имеет такие основные недостатки:

1) регулирование цикловой подачи топлива осуществляется по ограниченному количеству информационных переменных (чаще всего по угловой скорости коленчатого вала двигателя ω_d , положению педали акселератора γ_d и давлению наддува p_k), что связано с отсутствием электрического исполнительного элемента регулятора, а, значит, с невозможностью использования электронного блока управления;

2) трудности в идентичности цикловых подач по цилиндрам при использовании ТНВД секционного типа, что приводит к увеличению крутильных колебаний коленчатого вала и как следствие снижает надёжность мотора и трансмиссии, а также повышает их материалоемкость.

Поэтому, чтобы избавиться от недостатков как системы *Common-Rail*, так и традиционной, и в то же время не утратить их достоинств, предложено в перспективной системе подачи топлива применить ТНВД распределительного типа. Но регулирование цикловой подачи в нём осуществлять с помощью электромагнитного клапана слива топлива из нагнетательной полости ТНВД, т. е. как в форсунках *Common-Rail*. Это решение закреплено патентом.

На рис. 1 показан эскиз опытного образца ТНВД, разработанный автором. С помощью математического моделирования на ЭВМ выбраны его рациональные параметры [1].

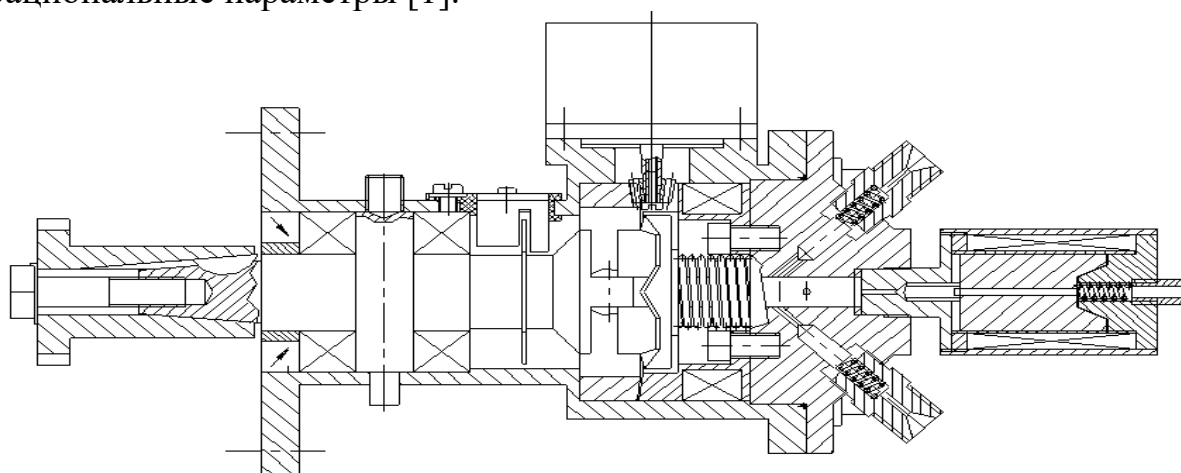


Рис. 1. Эскиз опытного образца перспективного ТНВД

Основными элементами данного насоса являются: корпус с поворотными роликовыми упорами; приводной вал с насосом подкачки, индуктором датчика Холла и муфтами; кулачковая шайба с плунжером; головка с нагнетательными клапанами; система управления, состоящая из двух модулей:

- 1) системы управления цикловой подачи топлива;
- 2) системы управления опережением впрыска топлива.

Структурная электрическая схема системы управления ТНВД представлена на рис. 2.

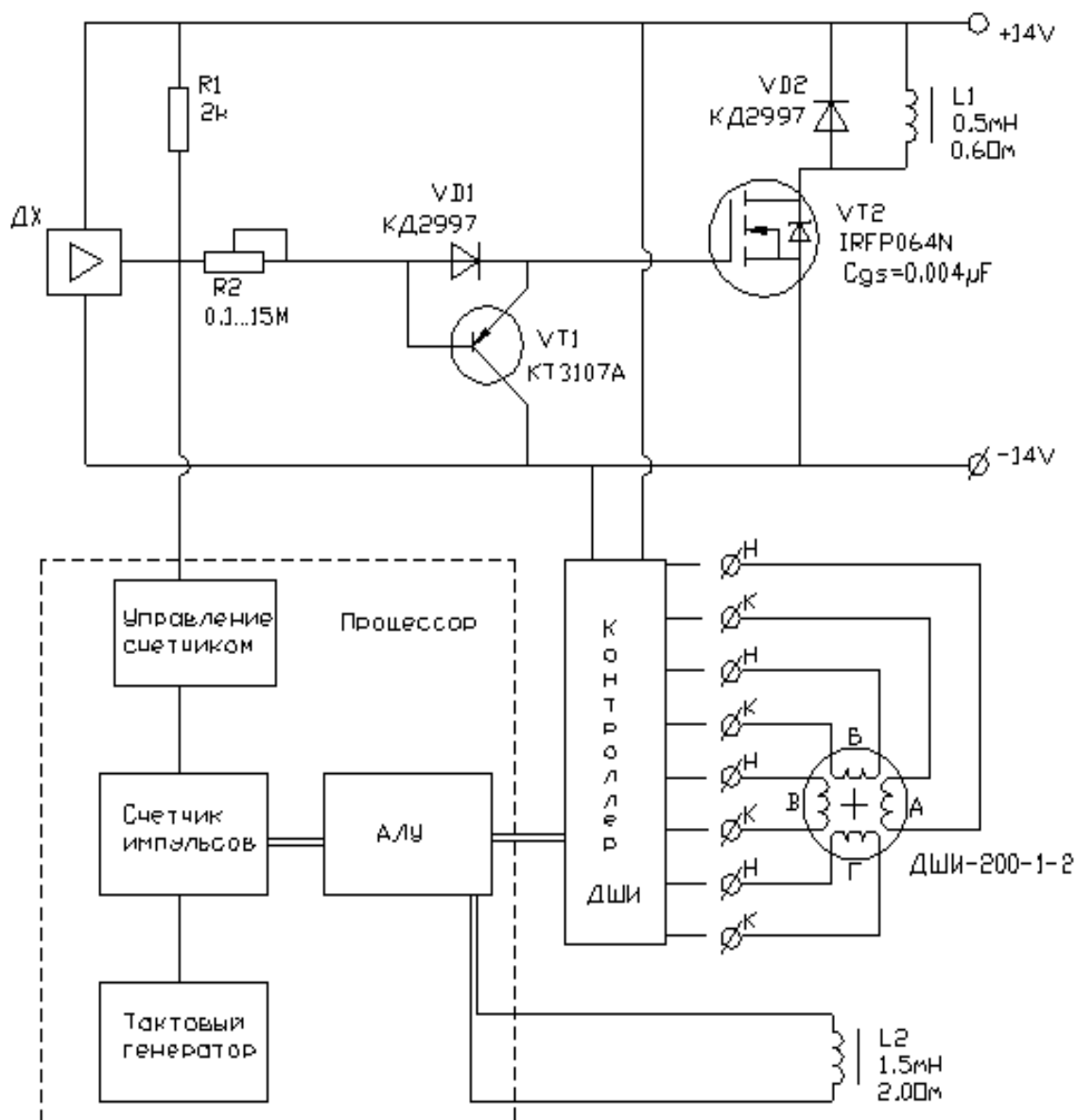


Рис. 2. Структурная схема системы управления ТНВД

Выходным элементом системы управления цикловой подачи топлива $q_{ц}$ ТНВД является электромагнитный клапан. Через него заполняется надплунжерная полость насоса, и он же прекращает её подачу.

Основные параметры электроклапана ТНВД следующие:

1) максимальный ход якоря электромагнита $\delta = 0,5$ мм (такой малый ход выбран с целью максимизации электромагнитной силы притяжения якоря для минимизации времени срабатывания электроклапана);

2) диаметр дросселя, через который связаны надплунжерная полость и электроклапан $d_c = 1$ мм (выбран с целью минимизации силы давления топлива на клапан и якорь);

3) преднатяг пружины $F_{пр.0} = 80$ Н (зависит от d_c и максимального давления впрыска топлива $p_{вп}^{max}$);

4) диаметр якоря электромагнита $d_я = 25$ мм;

5) число витков катушки электромагнита $n = 180$;

6) диаметр провода катушки $d_{пр} = 1,0$ мм.

Эти параметры выбраны для $p_{вп}^{max} \approx 100$ МПа. При таком давлении (без учёта сил инерции) и принятом диаметре плунжера 10 мм на него, кулачковую шайбу, упоры, головку и её крепёж действует сила 7500 Н.

Анализ экспериментальных переходных характеристик опытного образца электроклапана позволяет сделать вывод, что время срабатывания его составляет 0,5 мс. Опираясь на эти данные, выбран конструктивный угол $\varphi_1 = 10^\circ$ по углу поворота вала насоса между началом закрытия индуктором щели в датчике Холла (ДХ), т. е. поступлением сигнала с ДХ на прекращение подачи топлива, и началом набегания кулачков шайбы на упоры, т. е. началом сжатия и подачи топлива плунжером.

Включение катушки L1 электроклапана ТНВД осуществляется выходным транзистором VT2, который по результатам испытаний должен выдерживать ток до 100 А. Поэтому в качестве VT2 принят полевой транзистор IRFP064N, выдерживающий максимальный ток 110 А и имеющий свою емкость «затвор-исток» $C_{gs} = 0,004$ μ F. При отключении L1 (запирание транзистора VT2) вступает в работу диод VD2, через который происходит разряд токов самоиндукции катушки L1.

Выходной транзистор VT2 включается с задержкой времени t_3 от начала поступления сигнала с ДХ. Эта задержка определяет величину цикловой подачи топлива $q_{ц}$. Чем больше t_3 , тем больше топлива поступает в цилиндр. Максимальная величина $q_{ц}$ должна быть при запуске мотора и составляет (без учёта утечек, зависящих от радиального зазора между плунжером и головкой, вязкости топлива и герметичности электроклапана)

$$q_{ц,зап} = A_{п} h_{п} = \frac{\pi d^2}{4} h_{п} = \frac{3,14 \cdot 10^2}{4} 4 = 314 \text{ мм}^3, \quad (1)$$

где $A_{п}$ – площадь торца плунжера, мм^2 ; $h_{п}$ – ход плунжера (высота кулачков шайбы), мм; d – диаметр плунжера, мм.

При этом кулачковая шайба повернётся на выбранный угол максимального подъёма кулачка $\varphi_{п} = 20^\circ$ по углу поворота вала насоса, а плун-

жер поднимется на 4 мм (максимальная выбранная высота кулачков шайбы), и только после этого при запуске мотора должен включиться электроклапан, открывая надплунжерную полость для заполнения топливом от насоса подкачки, производительность которого в пластинчатом варианте составляет (без учёта утечек) 420 мм³/цилиндр.

Отключение клапана должно произойти не менее, чем через выбранный угол опускания плунжера (угол сбегу кулачка) $\varphi_0 = 20^\circ$, чтобы полностью наполнилась надплунжерная полость топливом от насоса подкачки.

На номинальном режиме работы мотора цикловая подача топлива в 2 раза меньше пусковой, т. е. $q_{ц.н} = 157 \text{ мм}^3$. Отсюда следует, что данный ТНВД подходит к безнаддувному четырёхцилиндровому дизелю с рабочим объёмом до

$$iV_h = i \frac{\rho_r}{\rho_b} \alpha k q_{ц.н} = 4 \frac{850}{1,2} 1,5 \cdot 14,5 \cdot 157 \cdot 10^{-3} = 9600 \text{ см}^3 = 9,6 \text{ л} , \quad (2)$$

где i – количество цилиндров дизеля; ρ_r – плотность топлива, кг/м³; ρ_b – плотность воздуха, кг/м³; α – средний коэффициент избытка воздуха в цилиндре дизеля; k – стехиометрический коэффициент реакции горения топлива.

Для дизеля с наддувом рабочий объём уменьшается на величину π_k – степень повышения давления наддува ($\pi_k = 1,5 \dots 2,5$). Например, для дизеля Д-145Т имеем $iV_h = 4,5 \text{ л}$; $\pi_k = 1$.

Время задержки t_3 включения VT2 зависит от параметров РС-цепочки, т. е. от сопротивления резистора R2 и емкости «затвористок» VT2, где резистор R2 является датчиком положения педали (рычага) управления подачей топлива (педаль «газа»). Чем сильнее водитель нажимает на педаль управления подачей топлива, тем больше сопротивление переменного резистора R2. Значит, больше задержка времени от момента поступления сигнала с ДХ и включением VT2, т. е. началом падения давления и слива топлива из надплунжерной полости ТНВД. Поэтому больше топлива поступит в цилиндр дизеля.

Для нормальной работы датчика Холла ВА3-2108 в схеме необходим резистор подпитки R1 номиналом 2 килоома между «плюсовым» проводом датчика и информационным (средним). Из этих же требований, минимальное сопротивление цепи между информационным проводом и «минусовым» ДХ, т.е. сопротивление переменного резистора R2, должно быть не менее 100 килоом ($R_{2\text{min}} = 100 \text{ к}$).

Прекращение подачи топлива в цилиндры при максимальной частоте вращения коленчатого вала дизеля Д-145Т ($n_{х.х}^{\text{max}} = 2200 \text{ об/мин}$) должно производиться через 10° (0,17 рад) поворота вала насоса от момента поступления сигнала с ДХ, т. е. через выбранный угол φ_1 . В этом случае время задержки включения L1 равно

$$t_3^{\min} = \frac{\varphi_1}{\omega_{\text{н.х.х}}^{\max}} = \frac{0,17}{110} = 0,0015 \text{ с}, \quad (3)$$

где $\omega_{\text{н.х.х}}^{\max}$ – угловая скорость вала насоса на максимальном холостом ходу дизеля, рад/с.

Зная емкость «затвор-исток» VT2 и t_3^{\min} можно определить минимальное сопротивление резистора R2_{min} (педаль «газа» не нажата)

$$R2_{\min} = \frac{t_3^{\min}}{3 C_{gs}} = \frac{0,0015}{3 \cdot 4 \cdot 10^{-9}} = 125000 = 125 \text{ кОм}, \quad (4)$$

где C_{gs} – емкость «затвор-исток» VT2, Фарад.

Максимальная величина t_3 имеет место при запуске мотора, когда угловая скорость насоса составляет $\omega_{\text{н.зап}} = 5$ рад/с и педаль «газа» полностью нажата. При этом угол поворота вала насоса от поступления сигнала с ДХ до включения L1 должен составлять 50° (0,87 рад). Этот угол складывается из:

- 1) $\varphi_1 = 10^\circ$ по углу поворота вала насоса;
- 2) угла подъема кулачка $\varphi_{\text{п}} = 20^\circ$ по углу поворота вала насоса;
- 3) угла поворота упоров (разность углов опережения впрыска при запуске, когда $\theta_{\text{н.зап}} = 0^\circ$ от ВМТ, и на номинальном режиме, $\theta_{\text{н.Н}} = 40^\circ$ по углу поворота коленчатого вала (ПКВ)), т. е. $\Delta\varphi_y = 20^\circ$ по углу поворота вала насоса

$$t_3^{\max} = \frac{\varphi_1 + \varphi_{\text{п}} + \Delta\varphi_y}{\omega_{\text{н.зап}}} = \frac{0,87}{5} = 0,1745 \text{ с}. \quad (5)$$

Имея максимальную величину задержки t_3^{\max} , которую должна отрабатывать RC-цепочка блока управления, с учетом емкости C_{gs} , можно оценить максимальное сопротивление переменного резистора R2 (педаль «газа» полностью нажата)

$$R2_{\max} = \frac{t_3^{\max}}{3 C_{gs}} = \frac{0,1745}{3 \cdot 4 \cdot 10^{-9}} = 15 \text{ МОм}. \quad (6)$$

Т. е. переменный резистор R2 должен иметь диапазон от 125 килоом до 15 мегом.

Транзистор VT1 и диод VD1 необходимы для разрядки емкостей VT2 при отсутствии сигнала с ДХ.

Для управления шаговым электродвигателем (ДШИ), поворачивающим упоры, положение которых определяет угол опережения впрыска $\theta_{\text{н}}$ (по углу ПКВ), необходима схема с датчиком угловой скорости коленчатого вала дизеля или вала насоса. Эту функцию может выполнять тот же ДХ, если организовать в системе управления ДШИ (в процессоре) подсчет импульсов тактового генератора, например, при наличии сигнала с ДХ или наоборот – при отсутствии сигнала. Количество этих импульсов накапливает «счетчик» (Сч), т. е. управляемая ячейка памяти процессора. Количе-

ство импульсов $Sч$ обратно пропорционально угловой скорости вала насоса, т. е. чем быстрее вращается вал, тем меньше $Sч$, и наоборот. Также процессор должен иметь память (внутреннюю или внешнюю) для хранения программы управления и арифметико-логическое устройство (АЛУ), обеспечивающее сравнение, вычисление, считывание и запись данных.

Алгоритм работы программы процессора должен реализовывать связь между желаемым углом опережения впрыска θ_n (градусы ПКВ) и угловой скоростью коленчатого вала ω_d (см. рис. 3, а) или, что то же самое, связь между углом поворота вала шагового двигателя $\varphi_{дши}$ (градус вала ДШИ) и количеством импульсов тактового генератора в счётчике $Sч$ (см. рис. 3, б).

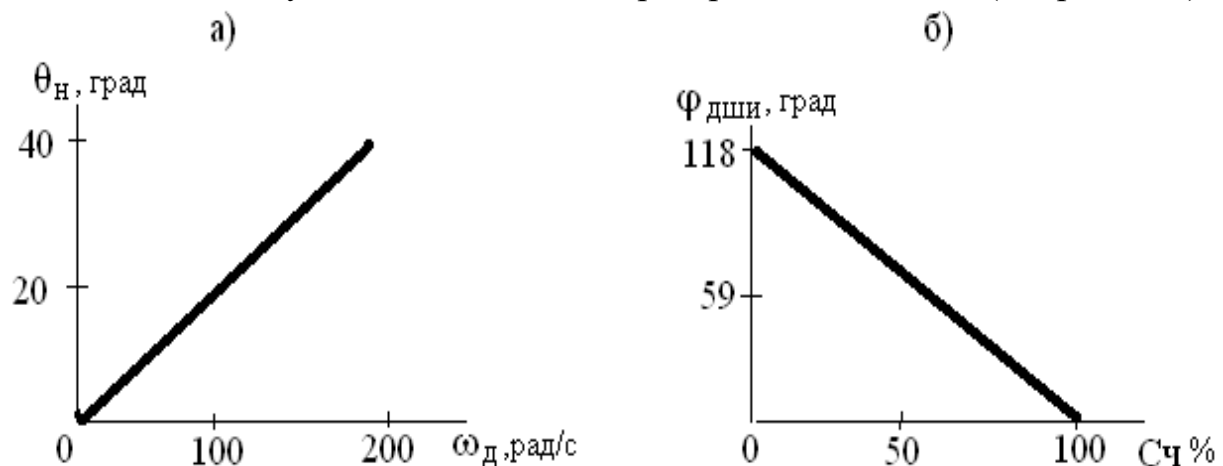


Рис. 3. Зависимость угла опережения впрыска от скорости

Максимальный угол поворота $\varphi_{дши}^{max}$ с учётом выбранного передаточного числа конического редуктора привода упоров насоса составляет

$$\varphi_{дши}^{max} = \Delta\varphi_y \cdot n_k = 20 \cdot 5,9 = 118^\circ, \quad (7)$$

где $\Delta\varphi_y$ – максимальный угол поворота упоров ТНВД по углу вала насоса; n_k – передаточное число конического редуктора привода упоров.

При этом упоры ТНВД повернутся на $\Delta\varphi_y = 20^\circ$ по углу поворота вала насоса, что соответствует $\theta_n = 40^\circ$ по углу поворота коленчатого вала.

Аналитическая аппроксимация графика на рис. 3, б выражается зависимостью

$$\varphi_{дши} = 118 - 1,18 \cdot Sч. \quad (8)$$

Алгоритм работы программы процессора по управлению положением упоров представлен на рис. 4.

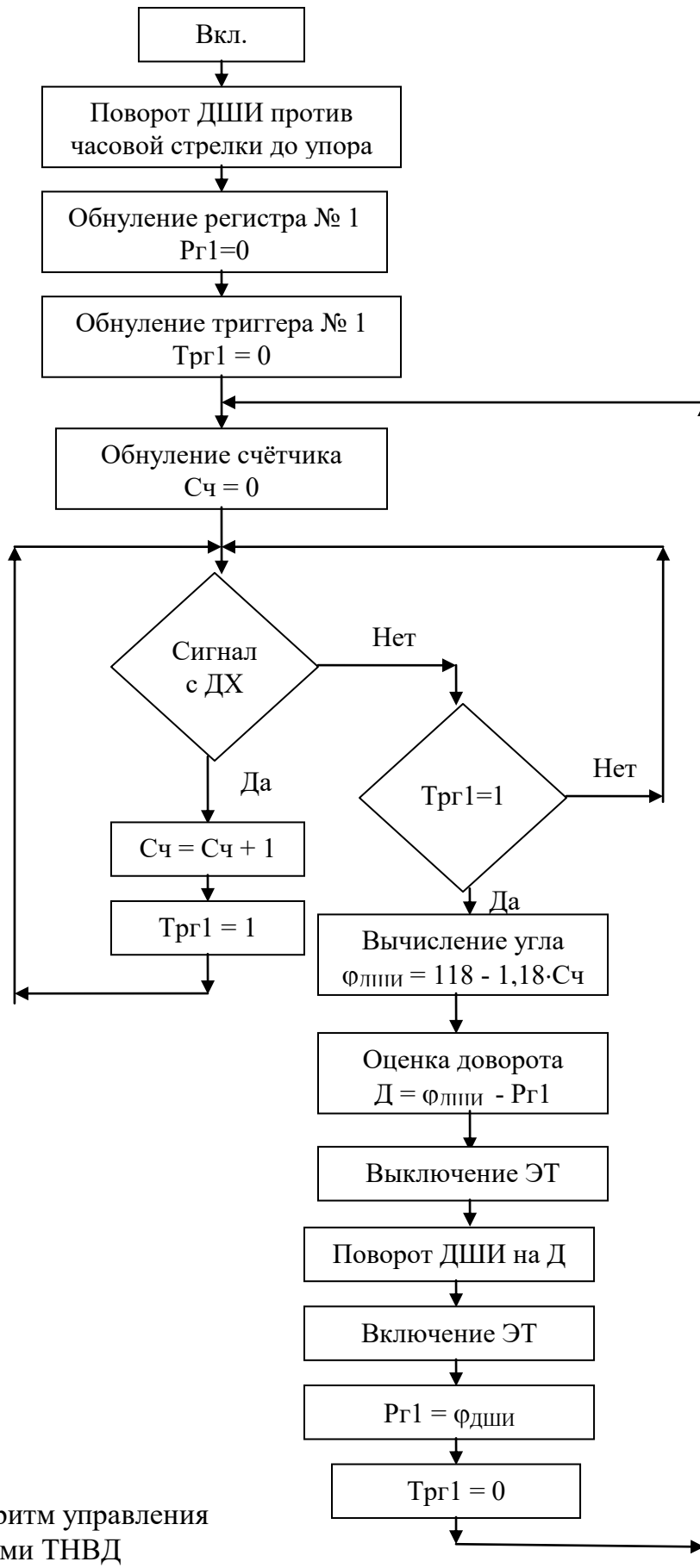


Рис. 4. Алгоритм управления упорами ТНВД

Система управления опережением впрыска (упорами) включает в себя помимо шагового электродвигателя также электромагнитный тормоз (ЭТ). На схеме управления ЭТ показан в виде катушки L2. Данный тормоз должен надёжно фиксировать упоры при набегании на них кулачковой шайбы, так как окружные силы, стремящиеся повернуть упоры в сторону вращения вала насоса, при максимальном давлении впрыска ориентировочно могут составлять до десятой части от сил давления топлива, т. е. примерно 750 Н.

Как показали результаты моделирования на ЭВМ, многоступенчатый впрыск можно обеспечить путём повышения быстродействия электроклапана ТНВД за счёт, например, увеличением напряжения электропитания с 14 до 50 или даже 70 V, что, кстати, имеет место в системах *Common-Rail*.

Применение данного ТНВД с серийно выпускаемыми форсунками, например, ФД-22, позволит получать любые характеристики дизеля при существенно меньшей стоимости системы подачи топлива в сравнении с *Common-Rail*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кузнецов, Е. В.** Структура и выбор параметров перспективной топливной системы дизеля / Е. В. Кузнецов // Автомобильная промышленность. – 2004. – № 6. – С. 13–16.