

УДК 621.43.01

UDC 621.43.01

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДИЗЕЛЯ ВВЕДЕНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ПО НАГРУЗКЕ**

**IMPROVING THE MANAGEMENT OF INTRODUCTION OF ADDITIONAL MOMENTUM OF ENGINE LOAD**

Шакиров Ренат Равилевич  
ст. преподаватель  
*Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, Ижевск, Россия*

Shakirov Renat Ravilevich  
senior lecturer  
*Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.*

Иншаков Александр Павлович  
д.т.н., профессор  
*Мордовский Государственный Университет, Саранск, Россия*

Inshakov Alexander Pavlovich  
Dr.Sci.Tech., professor  
*Mordovia State University, Saransk, Russia*

Вахрамеев Дмитрий Александрович  
к.т.н., доцент  
*Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, Ижевск, Россия*

Vahrameev Dmitry Aleksandrovich  
Cand.Tech.Sci., associate professor  
*Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.*

В статье изложены теоретические и экспериментальные исследования работы двигателя, входящего в состав машинно-тракторного агрегата, работающего на неустановившихся режимах с применением регулирующего импульса по нагрузке

Theoretical and experimental studies of engine of machine and tractor aggregates in unsteady modes of operation of working processes that use controlling load impulse are described

Ключевые слова: ТРАКТОР, ДВИГАТЕЛЬ, НАГРУЗКА, РЕГУЛЯТОР

Keywords: TRACTOR, ENGINE, LOAD, CONTROLLER.

При выполнении машинно-тракторным агрегатом (МТА) энергоемких сельскохозяйственных работ на него действует постоянно изменяющаяся нагрузка, колебания которой достаточно велики и достигают 30 – 40 % от крюкового усилия трактора. Такое действие нагрузки характерно именно для МТА.

Колебания нагрузки приводят к появлению переходных процессов в двигателе МТА. Учитывая то, что двигатель МТА во время выполнения операций работает с неустановившейся нагрузкой в течение 60 - 70% рабочего времени, процессы, происходящие в двигателе МТА во время работы с неустановившейся нагрузкой, оказывают огромное влияние на общий характер его работы.

В теории автотракторных двигателей отсутствует понятие

динамических характеристик двигателя. При этом сельскохозяйственное производство эксплуатирует их в динамических режимах.

При работе двигателя МТА с нагрузками, близкими к полной, резко возрастают колебания оборотов, в результате чего нарушаются агротехнические требования выполнения операции. Для того чтобы производить выполнение сельскохозяйственной операции в строгом соответствии с агротехническими требованиями рекомендуется недозагружать двигатель МТА на 20 – 30 % в зависимости от вариации нагрузки. В результате к потерям индикаторных показателей добавляются потери от недоиспользования мощности, которые по Удмуртской Республике, на основании проведенных расчетов, составляют ежегодно около 250 МВт.

Немаловажную роль в обеспечении оптимального качества переходного процесса двигателя МТА играет регулятор дизеля. Регулятор – это именно та часть двигателя, которая должна обеспечивать устойчивость его работы во время изменения нагрузки.

Исследования работы дизелей показали, что значительное влияние переходного процесса на эффективные и экономические показатели работы двигателя происходит во время больших отклонений частоты вращения относительно установившегося режима. Когда колебания частоты вращения происходят в пределах степени нечувствительности регулятора показатели работы и часовой расход топлива практически не изменяется[4,5].

Резкие колебания нагрузки приводят к значительным изменениям скорости вращения вала двигателя. Основываясь на проведенных ранее исследованиях, можно сказать, что всережимный регулятор оборотов двигателя МТА обеспечивает относительно качественную работу двигателя только при незначительных колебаниях скорости вращения. Резкое изменение нагрузки приводит к тому, что регулятор не успевает

должным образом на него отреагировать, в результате появляется значительный заброс угловой скорости вращения, что, в конечном итоге, приводит к снижению качества работы двигателя и в целом МТА.

Изучая работу двигателя с резким характером неустановившейся нагрузки, было получено снижение мощности двигателя до 20%, экономичности - на 12%. При этом отмечается, что регулятор двигателя срабатывает с опозданием на 1,5 - 2,0 секунды по отношению к изменению нагрузки [4,5].

Одним из наиболее эффективных способов совершенствования динамических режимов работы двигателя является использование дополнительного импульса по нагрузке [2].

Анализируя реальные условия эксплуатации, рассмотрим работу двигателя при выполнении одной сельскохозяйственной операции. В этом случае масса и передача, на которой работает трактор, постоянны.

Для определения эффективных и индикаторных показателей двигателя во время переходных режимов профессором Юлдашевым А. К. [4,5] предложена методика построения математической модели с помощью аperiодических воздействий.

При исследовании динамических процессов желательно более полное использование существующих понятий, чтобы получить картину в привычном представлении. Но при исследовании переходных и неустановившихся процессов целый ряд показателей становится трудно определяемым [1,3]. Поэтому из всего многообразия параметров необходимо выбрать главные, с помощью которых можно было бы с минимальными затратами средств и времени определить нарушения в процессах и изменения в выходных показателях двигателя при переходных режимах.

Как уже отмечалось, переходный процесс нарушает нормальное протекание всех рабочих процессов в двигателе. Одной из главных причин

этих негативных процессов можно считать ускорения, появляющиеся во время переходного процесса. Появляющиеся во время смены скоростного режима ускорения вызывают появление инерционных сил, которые непосредственно влияют на характер переходного процесса.

Поэтому, если сравнивать между собой выше представленные показатели качества переходного процесса, более полно оценивают переходный процесс показатели изменения скоростного режима двигателя. Чем значительнее эти изменения по величине, тем более значительные ускорения будут иметь движущиеся материи в двигателе, что, в конечном итоге, приведет к большим изменениям параметров рабочего процесса.

Выше сказанные утверждения, в том числе, базируются и на математической модели переходного процесса двигателя. В этих уравнениях четко прослеживается зависимость основных параметров двигателя от изменения скоростного режима.

Поэтому при построении математической модели процесса регулирования в первую очередь необходимо оценить изменения скоростного режима двигателя. Для этого можно воспользоваться уравнением движения двигателя внутреннего сгорания [2]:

$$T_d d\varphi / dt + K_d \varphi = - \eta - \delta, \quad (1)$$

где  $T_d$  – коэффициент, имеющий размерность времени; он характеризует относительную инерционность регулируемого объекта;

$K_d$  – безразмерный коэффициент, характеризующий способность регулируемого объекта к самовыравниванию (коэффициент самовыравнивания);

$$\varphi = \Delta\omega / \omega_0; \quad (2)$$

$$\eta = \Delta h / h_0; \quad (3)$$

где  $\delta$  - степень повышения момента сопротивления;

$\omega_0$  - угловая скорость в положении равновесия;

$h_0$  - координата положения рейки топливного насоса;

Экспериментальные исследования были проведены на базе двигателя Д-242.

Чтобы значительно упростить составление математической модели переходного процесса при использовании регулирования по нагрузке предлагается ввести ряд допущений.

Во-первых, незначительные изменения нагрузки двигателя можно не учитывать при разработке математической модели.

Во-вторых, принимаем, что значительные изменения нагрузки происходят за небольшой промежуток времени, и момент сопротивления увеличивается по прямо пропорциональной зависимости до определенного конечного значения.

Определение оптимальных параметров исследуемого регулятора производилось при помощи симметричных некомпозиционных планов Бокса-Бенкена. Варьировались максимальная цикловая подача топлива, изменение цикловой подачи топлива и момент сопротивления.

В качестве результирующих параметров использовались: положительный заброс частоты вращения двигателя, об/мин; заброс частоты вращения, об/мин; наибольшее ускорение коленчатого вала, (об/мин)/с. По каждому из результирующих параметров составлялись уравнения регрессии.

В результате были получены следующие уравнения регрессии.

Зависимость положительного заброса частоты вращения от параметров регулирования:

$$Y_{1(0,85N_{\text{нн}})} = 56,66 + 18,75X_1 + 20X_2 + 7,5X_1X_2 - 15,84X_1^2 - 8,34X_2^2, \quad (4)$$

$$Y_{1(0,90N_{\text{нн}})} = 46,66 + 15,63X_1 + 23,13X_2, \quad (5)$$

$$Y_{1(0,95N_{\text{нн}})} = 43,33 + 19,38X_1 + 18,75X_2, \quad (6)$$

$$Y_{1(1,00N_{\text{ен}})} = 35 + 22,5X_1 + 21,25X_2. \quad (7)$$

Зависимость общего заброса частоты вращения от параметров регулирования:

$$Y_{2(0,85N_{\text{ен}})} = 309,9 - 55,63X_1 + 87,5X_2 + 359,4X_3 + 104,3X_1^2 + 95,55X_2^2 + 191,8X_3^2, \quad (8)$$

$$Y_{2(0,90N_{\text{ен}})} = 344,9 - 65,63X_1 + 115X_2 + 366,9X_3 + 76,8X_1^2 + 145,5X_2^2 + 164,3X_3^2, \quad (9)$$

$$Y_{2(0,95N_{\text{ен}})} = 471,6 + 108,1X_2 + 362,5X_3, \quad (10)$$

$$Y_{2(1,00N_{\text{ен}})} = 484,9 + 99,38X_2 + 370,6X_3 + 129,9X_3^2. \quad (11)$$

Зависимость наибольшего ускорения коленчатого вала от параметров регулирования:

$$Y_{3(0,85N_{\text{ен}})} = 130,2 - 24,76X_1 + 34,1X_2 + 161,4X_3 + 38,25X_1^2 + 126,6X_3^2, \quad (12)$$

$$Y_{3(0,90N_{\text{ен}})} = 157,8 - 30,84X_1 + 42,94X_2 + 200,1X_3 - 47,7X_1X_3 + 36,8X_2X_3 + 24,34X_1^2 + 46,69X_2^2 + 119,7X_3^2, \quad (13)$$

$$Y_{3(0,95N_{\text{ен}})} = 184,3 - 48,91X_1 + 194,9X_3 + 93,17X_3^2, \quad (14)$$

$$Y_{3(1,00N_{\text{ен}})} = 159,9 - 29,96X_1 + 32,06X_2 + 219,1X_3 - 42X_1X_2 + 48,43X_2X_3 + 34,09X_1^2 + 58,04X_2^2 + 136,7X_3^2. \quad (15)$$

В выше представленных уравнениях  $X_i$  - величины параметров в кодированном масштабе, связанные со значениями факторов в натуральном масштабе ( $x_i$ ) следующими соотношениями:

$$x_1 = 1 + X_1 \Delta x_1 / 2, \quad (16)$$

$$x_2 = 0,5 + X_2 \Delta x_2 / 2, \quad (17)$$

$$x_3 = x_{30} + X_3 \Delta x_3 / 2. \quad (18)$$

Все выше представленные уравнения проверены на адекватность модели.

Полученные после оптимизации параметры регулирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Оптимальные значения параметров регулирования

Уравнение	Параметры					
	X <sub>1</sub>	x <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	x <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	x <sub>3</sub>
Y <sub>1(0,85N<sub>ем</sub>max)</sub>	-1	0	-1	0	—	—
Y <sub>1(0,90N<sub>ем</sub>max)</sub>	-1	0	-1	0	—	—
Y <sub>1(0,95N<sub>ем</sub>max)</sub>	-1	0	-1	0	—	—
Y <sub>1(1,00N<sub>ем</sub>max)</sub>	-1	0	-1	0	—	—
Y <sub>2(0,85N<sub>ем</sub>max)</sub>	0,267	1,267	-0,458	0,271	-0,916	0,26
Y <sub>2(0,90N<sub>ем</sub>max)</sub>	0,427	1,427	-0,395	0,303	-1	0,18
Y <sub>2(0,95N<sub>ем</sub>max)</sub>	—	—	-1	0	-1	0,12
Y <sub>2(1,00N<sub>ем</sub>max)</sub>	—	—	-1	0	-1	0,05
Y <sub>3(0,85N<sub>ем</sub>max)</sub>	0,320	1,320	-1	0	-0,640	0,27
Y <sub>3(0,90N<sub>ем</sub>max)</sub>	-0,208	0,792	0,121	0,560	-0,858	0,19
Y <sub>3(0,95N<sub>ем</sub>max)</sub>	1	2	—	—	-1	0,12
Y <sub>3(1,00N<sub>ем</sub>max)</sub>	0,630	1,630	0,309	0,655	-1,075	0,05

Анализируя полученные результаты оптимизации, можно сделать некоторые выводы:

а) выбор оптимальных параметров по уравнениям зависимости Y<sub>1(0,85N<sub>ем</sub>)</sub>; Y<sub>1(0,90N<sub>ем</sub>)</sub>; Y<sub>1(0,95N<sub>ем</sub>)</sub>; Y<sub>1(1,00N<sub>ем</sub>)</sub>; Y<sub>2(0,95N<sub>ем</sub>)</sub>; Y<sub>2(1,00N<sub>ем</sub>)</sub>; Y<sub>3(0,95N<sub>ем</sub>)</sub> произведен быть не может, в связи с отсутствием в уравнениях регрессии отдельных параметров регулирования, в результате зависимость не в состоянии достоверно характеризовать действительные процессы;

б) отмечается достаточно четкая закономерность положения оптимальных значений параметров регулирования, определяемых в зависимости от различных результирующих функций, а именно параметр  $x_1$  располагается около центра эксперимента с некоторым смещением в положительную сторону, параметр  $x_2$  располагается около центра эксперимента с некоторым смещением в отрицательную сторону, параметр  $x_3$  располагается на отрицательной границе эксперимента.

На основании приведенных выводов и для облегчения дальнейших расчетов возникла необходимость в выборе одного уравнения регрессии из выше представленных. Как уже отмечалось выше, основной причиной нарушения слаженной работы систем двигателя, увеличения износов деталей во время переходного процесса являются ускорения, появляющиеся во время изменения скоростного режима. Поэтому уравнения зависимости наибольшего ускорения от параметров регулирования имеют большее предпочтение, то есть более полно описывают характер изменений. Кроме этого, анализируя все выше представленные уравнения регрессии, зависимости ускорения коленчатого вала включают в себя большее количество значимых зависимостей, и, поэтому, можно предположить, что эти уравнения более точно характеризуют действительные процессы в двигателе.

Наиболее удобным в этой ситуации, является уравнение зависимости  $Y_{3(0,90N_{ен})}$ . Из этого уравнения исключен только один статически незначимый коэффициент регрессии. Кроме того, имеющийся 10% запас мощности позволит обеспечить соблюдение агротехнических требований при выполнении операции, когда колебания нагрузки невелики.

Если рассмотреть каждый параметр регулирования в отдельности, то необходимо отметить различный характер их изменения. Степень повышения момента сопротивления величина случайная при выполнении сельскохозяйственных работ, и как-то ее регулировать достаточно сложно.

Это возмущающий параметр, и система регулирования должна обеспечить наиболее качественную работу двигателя при различных возмущающих воздействиях.

В этом случае, необходимо опираться на величину увеличения момента сопротивления, считать ее отправной точкой при выборе оптимальных параметров регулирования. Повышение момента сопротивления характеризуется общим состоянием обрабатываемого участка поля и непосредственно вызывает появление переходного процесса в двигателе.

Для определения оптимальных значений параметров регулирования при различных условиях нагружения двигателя использовалось уравнение регрессии (13), признанное математической моделью, наиболее полно характеризующей переходный процесс, при этом считаем, что уравнение характеризует рабочий процесс двигателя во всей области эксперимента.

В этом уравнении вместо значений степени повышения момента сопротивления были подставлены определенные значения параметра  $X_3$  от -1 до 1 с шагом 0,1. В результате были получены уравнения регрессии, которые описывают переходный процесс, вызванный конкретным увеличением момента сопротивления.

В каждом случае определены оптимальные значения параметров максимальной цикловой подачи топлива, и изменением цикловой подачи топлива, соответствующие определенной степени повышения момента сопротивления.

Анализируя результаты проведенных исследований, можно отметить увеличение эффективности работы регулирования по нагрузке при более резких ее набросах.

При использовании дополнительного регулирующего импульса по нагрузке снижается заброс частоты вращения, происходит увеличение мощности двигателя во время переходного процесса. Рост крутящего

момента происходит в более быстро, и это позволяет двигателю преодолевать возникающие перегрузки более эффективно, как следствие снижение удельного эффективного расхода топлива и увеличение эффективного КПД, повышение экономичности МТА и обеспечение качественного выполнения операции во время значительных набросов нагрузки.

Использование дополнительного регулирования по нагрузке позволит уменьшить запас мощности во время выполнения сельскохозяйственных операций на 4-6%.

Увеличение используемой мощности двигателя приведет к увеличению производительности машинно – тракторного агрегата, за счет использования меньшей величины передаточного отношения трансмиссии (увеличение скорости движения) или увеличения рабочей ширины сельскохозяйственной машины. Расчетное увеличение производительности машинно – тракторного агрегата составит 3 - 5%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Долганов К. Е., Голод И. И. Повышение используемой мощности тракторного дизеля совершенствованием регулятора частоты вращения. Двигатели внутреннего сгорания. Республиканский междуведомственный научно-технический сборник. Вып. 46, 1987.
2. Крутов В. И., Леонов И. В., Шатров В. И., Кузнецов А. Г. Методика статического расчета двухимпульсного (по скорости и давлению наддувочного воздуха) регулятора дизеля с турбонаддувом. Двигатели внутреннего сгорания. Республиканский междуведомственный научно-технический сборник. Вып. 48, 1988.
3. Покровский Г. П. Электронизация автомобильных двигателей. Двигатели внутреннего сгорания. Республиканский междуведомственный научно-технический сборник. Вып. 46, 1987.
4. Сеницкий С.А. Динамическая теория дизелей мобильных машин./ А.К. Юлдашев, М.М. Фролов.-Казань:Изд-во Казанского гос. ун-та, 2008.-106с.
5. Юлдашев А. К. Динамика рабочих процессов двигателя машино - тракторного агрегата. Казань, Татарское книжное изд-во, 1980.