

## Оптимизация работы дизелей сельскохозяйственных машин и тракторов

*Василий Чекменев*

Подольский государственный аграрно-технический университет  
Ул. Шевченка, 13, Каменец-Подольский, Украина, e-mail: bas\_ch@mail.ru

**Аннотация.** В статье проанализировано влияние неустановившихся нагрузок со стороны исполнительных механизмов на дизель. Показан один из путей уменьшения этих влияний выбором системы и способа его регулирования, проанализированы основные требования к дизелю с целью его оптимизации в таких условиях работы. Учитывая это, сформированы основные исполнительные функции для работы регулятора и его управления.

Как известно, со стороны исполнительных механизмов на дизель действуют неустановившиеся нагрузки, которые приводят к уменьшению средней его мощности и перерасходу топлива. Исследованию влияний этих нагрузок на работу двигателей (в частности дизеля), а также оптимизации их работы уделяют огромное внимание ученые и исследователи [1-8, 15-17].

Неустановившиеся колебания воздействуют на регуляторную и топливно подающую систему дизеля, по этому наибольшее внимание уделялось и уделяется регуляторам и способам регулирования [12, 18-22].

Из анализа различных графиков реакций сопротивления машин и механизмов установлено, что для моделирования неустановившихся нагрузок на стендах, а также для математического моделирования можно использовать гармонические колебания заданной частоты. Анализ проводился методами математического анализа и статистики.

Реальные условия регулирования для дизеля, при которых удельный расход топлива будет соответствовать или меньше номинального, составляют диапазон от  $0,5N_c$  до  $N_c$ . На этом участке для уменьшения влияния неустановившейся нагрузки скоростная характеристика регулирования должна иметь гиперболическую форму. Кроме того, в этих пределах мощности регулятор должен иметь независимое управление коррекцией цикловой подачи топлива.

**Ключевые слова:** дизель, непостоянная нагрузка, регулирование, регулятор, управление.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одной из основных проблем, на современном этапе развития общества в целом мире, является нахождение путей сохранения и экономного использования энергоресурсов [23-24]. Не последнее место, а то и ведущее, в этой проблеме занимают энергосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве. Основным энергетическим средством в сельском хозяйстве является двигатель внутреннего сгорания. Двигатели внутреннего сгорания используются, в основном, на комбайнах, тракторах и автомобилях. Основным двигателем является дизель.

Широкое внедрение устройств и приемов их использования для оптимизации режимов работы дизеля влечет значительное повышение топливной экономичности, которая дает возможность повысить его эксплуатационные свойства, и обеспечивает уменьшение токсичности по выбросам окисла углерода и углеводов [23-25].

Главные эксплуатационные характеристики дизеля – производительность и топливная экономичность [1-2, 7]. Улучшению этих характеристик уделяется большое внимание [23-29].

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Для разработки устройств и механизмов по оптимизации режимов работы дизеля необходимо учитывать влияния на их работу со стороны исполнительных машин и агрегатов [26-29]. Это дает возможность повысить эксплуатационные свойства мобильного средства, и обеспечивает значительную экономию энергоресурса [5, 7, 10, 16].

Оценивать эксплуатационную характеристику дизеля в реальных условиях необходимо с учетом не установившегося характера нагрузки, рис. 1. [10].

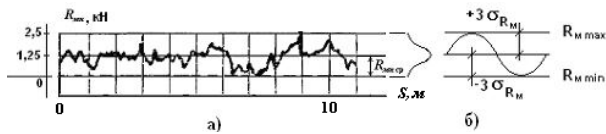


Рис. 1. Реакция сопротивления сельскохозяйственной машины  
Fig. 1. The reaction resistance of agricultural machine

Как видно на рис. 1 (б) влияние неустойчивых колебаний осуществляется по закону нормального распределения. И их можно моделировать на нагрузочных стендах в виде гармонических колебаний заданной частоты и амплитуды [6, 25-27].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью является исследование и обоснование технологической схемы и параметров работы регуляторов дизелей сельскохозяйственных машин и тракторов в условиях неустойчивых нагрузок для оптимизации их работы.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Неустойчивый характер тягового сопротивления рабочих машин в сочетании с непрерывными изменениями сопротивления передвижения трактора по полю вызывают колебание частоты вращения коленчатого вала дизеля, которые отражаются на работе регулировочной системы [14, 28-29]. Поскольку в связи с колебаниями, которые возникают, все процессы в дизеле изменяются не синхронно с изменением частоты вращения вала, и это приводит на фоне снижения мощности к перерасходу горючего [15, 25].

Для тракторов с механической системой регулирования работы дизеля подача горючего под действием неустойчивой нагрузки осуществляется тоже за данным законом [5, 6, 10, 17]. В этой связи их, с точки зрения математики, можно моделировать гармоническими колебаниями по определенной амплитуде и частоте, рис. 2. [10].

Для преодоления этих негативных последствий разрабатываются устройства и механизмы, которые снижают чувствительность дизеля к таким колебаниям. Наибольшее внимание уделяется регуляторам частоты вращения дизеля [11-12, 18-20].

Для успешной работы в этом направлении необходимо проанализировать обеспечение оптимальных условий для регулирования дизеля [28].

Коэффициент эксплуатационной нагрузки дизеля за крутящим моментом с учетом неустойчивой нагрузки оценивают коэффициентом эксплуатационной загрузки:

$$\xi_M = M_{e, \text{ср}} / M_{\text{ен}}, \quad (1)$$

где:

$M_{e, \text{ср}}$  – среднее значение крутящего момента, кН·м;

$M_{\text{ен}}$  – номинальное значение крутящего момента, кН·м.

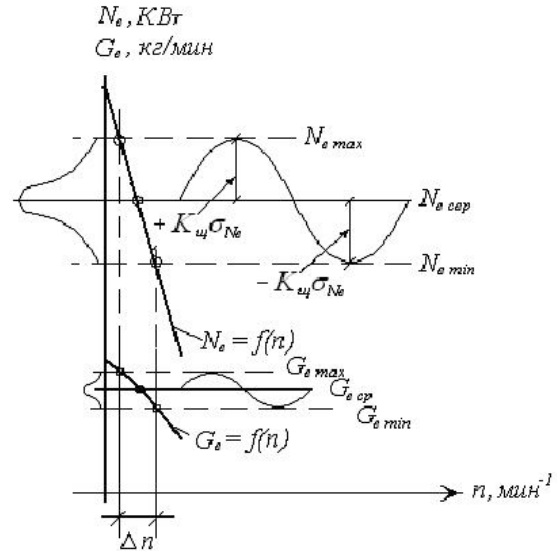


Рис. 2. Изменение мощности дизеля и часового расхода горючего под действием неустойчивой нагрузки по закону нормального распределения

Fig. 2. Change power of diesel and sentinel expense of fuel under the action of the inconstant loading by law of normal distribution

Или за мощностью:

$$\xi_{N_e} = N_{e, \text{ср}} / N_{\text{ен}}, \quad (2)$$

где:

$N_{e, \text{ср}}$  – среднее значение мощности, кВт.

Среднее значение мощности можно представить как:

$$N_{e, \text{ср}} = N_{e, \text{вл}} - K_{\text{ц}} \sigma_{N_e}, \quad (3)$$

где:

$N_{e, \text{вл}}$  – максимальное значение изменения мощности под импульсом неустойчивой нагрузки, кВт;

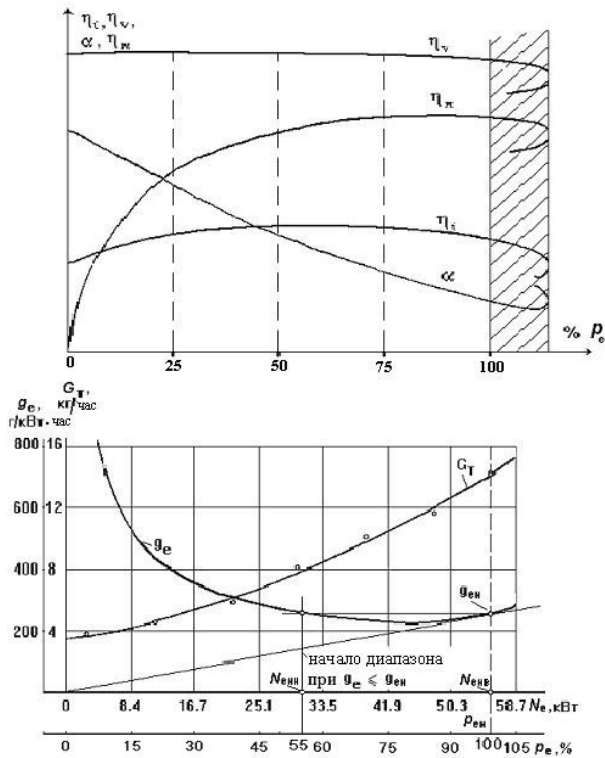
$K_{\text{ц}}$  – коэффициент, который характеризует плотность распределения нагрузки;

$\sigma_{N_e}$  – среднеквадратическое отклонение мощности.

Анализ формулы (3) показывает, что чем меньше среднеквадратическое отклонение мощности, тем больше среднее его значение и тем выше коэффициент эксплуатационной нагрузки.

Для определения диапазона регулирования мощности дизеля, при котором удельный расход топлива меньше или равный номинальному проведен анализ графика нагрузочной характеристики из проведенных экспериментальных исследований, (рис. 3), а также соответствующих графиков нагрузочных характеристик дизелей показанных Болтинским В. Н., Скотниковым в.А., Николаенко а.В., Крутовым в.И. и др. в трудах [1-4, 8-10].

Из анализа установлено, что верхний предел диапазона регулирования мощности соответствует началу зоны дымления, а нижний – удельному расходу топлива, который соответствует номинальному. Диапазон изме-



**Рис. 3.** Экспериментальная нагрузочная характеристика по расходу топлива тракторного дизеля при 2200 мин<sup>-1</sup>: N<sub>енв</sub> – верхний предел диапазона регулирования (номинальная мощность); N<sub>енн</sub> – нижний предел выбора диапазона регулирования

**Fig. 3.** Experimental loading description on the expense of fuel of diesel tractor at 2200 min<sup>-1</sup>: N<sub>енв</sub> – top limit of adjusting range (nominal power); N<sub>енн</sub> – lower limit of choice of adjusting range

нения мощности составляет от 100% до 55–65% от номинального значения.

Возникает необходимость теоретического обоснования в условиях нагрузочной характеристики интервала снижения мощности, на котором удельный расход топлива будет соответствовать номинальному значению.

При снижении максимально возможной мощности дизеля до 80% при постоянной частоте вращения коленчатого вала наблюдается минимальный удельный расход топлива (для разных типов двигателей данное значение имеет коэффициент вариации ± 5%).

Ввиду того, что зависимость удельного расхода топлива от эффективного давления (а отсюда и мощности) носит гиперболический характер, то логично предположить, что удельный расход топлива достигнет номинального значения при снижении мощности еще на 20% – 25%. Таким образом, коэффициент общего снижения мощности по меньшему значению составит  $N_e = 0,55...0,6N_{e\max}$ , или в процентах,  $N_e = 55...60\% N_{e\max}$ .

Таким образом, при снижении мощности дизеля до 60 % от максимального значения за счет снижения подачи топлива при постоянной частоте вращения коленчатого вала, значения  $g_e$  находится на участке, который не превышает предел номинального удельного расхода ( $g_{ен}$ ).

Это позволяет использовать диапазон мощности дизеля от 55...60% до 100% для его регулирования снижением подачи топлива, оставляя при этом постоянной частоту вращения коленчатого вала.

Поскольку изменение мощности зависит от подачи топлива, то уменьшение влияния на рейку топливного насоса со стороны неустановившейся нагрузки в рабочем диапазоне частот приведет к уменьшению амплитуды колебаний, а отсюда к уменьшению среднеквадратичного отклонения мощности. А это в свою очередь приведет к улучшению рабочих процессов в дизеле и уменьшению расхода топлива.

На рис. 4 показано влияние разных неустановившихся нагрузок на работу дизеля в виде гармонических колебаний на регуляторной ветви с гиперболической скоростной характеристикой по  $\Delta n$ .

Уменьшения среднеквадратичного отклонения можно достичь, уменьшив скорость роста функции изменения мощности и подачи топлива:

$$v_{G_e} = (G_e(n))^1 = (G_{e\max} - G_{e\min})dn,$$

$$v_{N_e} = (N_e(n))^1 = (N_{e\max} - N_{e\min})dn. \quad (4)$$

Осуществить оценку такого изменения можно через коэффициент вариации нагрузки:

$$v_{N_e} = \sigma_{N_e} / N_{e\text{ср}}. \quad (5)$$

Следовательно, чтобы обеспечить выполнение поставленных требований необходимо, чтобы регулятор на интервале частот неустановившейся нагрузки уменьшал влияние на рейку топливного насоса.

Как видно на рис.4 при одних и тех же колебаниях частоты вращения коленчатого вала  $\Delta n$  амплитуда колебаний мощности с приближением к номинальной частоте по гиперболической характеристике регулирования уменьшается благодаря уменьшению скорости роста изменения мощности в данной зоне  $tg(\gamma_2) > tg(\gamma_3)$ . При линейной характеристике регулирования скорость роста  $v_{N_e} = (N_e(n))^1 = tg(\gamma_1)$  можно считать постоянной во всем диапазоне изменения мощности на регуляторной ветке. Таким образом, рабочие процессы в дизеле с регулятором, который осуществляет регуляцию за гиперболической характеристикой (с приближением к номинальной частоте вращения), протекают лучше, что предопределяет улучшение эксплуатационных свойств и топливной экономичности.

Из рассмотренного очевидно, что при гиперболической регуляторной характеристике изменения мощности дизель должен работать по возможности ближе до номинальных оборотов коленчатого вала, что соответствует его номинальной мощности. В противном случае, при неполной загрузке дизеля, положительный эффект такого регулирования будет потерян, потому что обороты коленчатого вала будут приближаться к холостым и скорость роста функции на регуляторной ветви будет увеличиваться. Из этого следует, что для обеспечения положительного эффекта необходимо, чтобы при любой



Формально зависимость хода рейки  $X$  топливного насоса для данного регулятора можно представить такими зависимостями:

- для всережимного регулирования:

$$X = f(p)w,$$

- для коррекции подачи топлива без изменения частоты вращения коленчатого вала:

$$X = f(p)a,$$

- для комбинированного (однорежимного) способа регулирования:

$$X = f(w_p a_p).$$

За данной функциональной схемой был изготовлен механический регулятор для тракторов класса 1.4. [12]. Скоростная характеристика топливоподачи регулятора показана на рис. 6.

Анализируя эту характеристику, видим, что данный регулятор выполняет все сформированные основные исполнительные функции.

Например:

- при работе на транспортном режиме на начальном этапе топливный насос работает по характеристике ограниченной точками  $ABC$ . Ход рейки топливного насоса при этом – минимальный. Далее его работа осуществляется подобно однорежимному регулированию с наклонными характеристиками ограниченной точками  $CDE$ .
- при работе с приводными агрегатами работает на заданной частоте с коррекцией подачи топлива по линии  $EB$ , а регулятор выполняет ограничительную функцию по кривой  $BC$ .
- при отключении системы коррекции подачи горючего регулятор работает как всережимный.

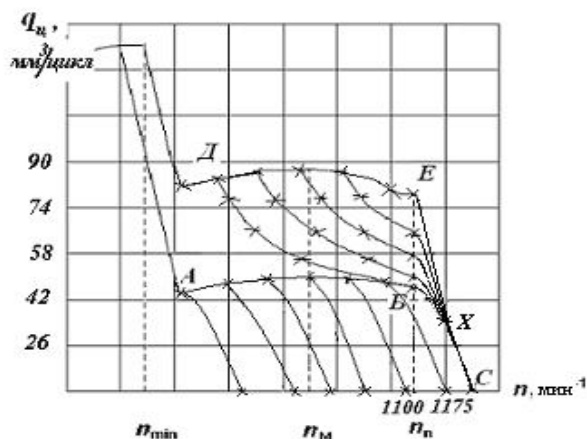


Рис. 6. Экспериментальная скоростная характеристика подачи топлива с экспериментальным универсальным регулятором

Fig. 6. Experimental speed description of serve of fuel with an experimental universal regulator

Проведенные исследования показали эффективность работы такой системы регулирования. Экономия горючего на разных работах при наработке дизеля 1400 моточасов составила в среднем 6,4%.

Полученные данные дают возможность создать соответствующие исполнительные механизмы и программное обеспечение для электронной системы регулирования дизеля с целью оптимизации его работы.

## ВЫВОДЫ

1. Разработки путей оптимизации работы дизелей являются неотложными и не потеряли свою актуальность.
2. Факторы влияния на работу дизеля имеют неустановившуюся характеристику.
3. Дизель нуждается в ограничении влияния неустановившихся нагрузок на регулировочную систему.
4. Технологическая схема и параметры работы регуляторов в регулировочной системе должны быть гибкими с возможностью переключения на любые режимы без остановки дизеля.
5. Эффективность работы такой системы регулирования дала экономию горючего на разных работах при наработке дизеля 1400 моточасов в среднем 6,4%.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ждановский А.В., Николаенко А.В., Щербак В.С. и др. 1981.** Режимы работы двигателей энергонасыщенных тракторов – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение. 240.
2. **Болтинский в.Н. 1962.** Теория, конструкция и расчет тракторных и автомобильных двигателей. – М.: Издательство сельскохозяйственной литературы, журналов и плакатов. 391.
3. **Болтинский В.Н. 1949.** Работа тракторного двигателя на неустановившейся нагрузке. – М.: Сельхозиздат. 216.
4. **Болтинский В.Н. 1959.** Мощность тракторного двигателя при неустановившейся нагрузке// Механизация и электрификация сельского хозяйства. №4. 13-16.
5. **Водяник И.И. 1994.** Эксплуатационные свойства тракторов и автомобилей. – К.: Урожай. 222. (Украина).
6. **Долганов к.Е., Бурко а.С., Романюк в.И., Ковалев с.А. 1986.** Математическое моделирование псевдослучайного процесса колебаний момента сопротивления, действующего на коленчатый вал тракторного дизеля // Двигателестроение. – № 2. 21-24.
7. **Ильченко в.Ю., Нагирный ю.П., Джалос п.А. и др. 1996.** за редакцией Ильченко в.Ю. и Нагирный ю.П. Машиноиспользование в земледелии. – К.: Урожай. 384. (Украина)
8. **Крутов в.И. 1989.** Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 414.
9. **Николаенко а.В. 1984.** Теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей. – М.: Колос. 335.

10. Скотников в.А., Машенский а.А., Солонский а.С. 1986. Основы теории и расчета трактора и автомобиля. – М: Агропромиздат. 384.
11. Чекаменев в.В. 2008. Влияние неустановившиеся нагрузки на дизель. Вестник Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. Петра Василенко. – вип. 75, т.1 – Харьков, № 59. 306 – 312. (Украина).
12. Водяник И. И., Чекаменев В. В. 2002. Пат. 50051А. Украина 7 Н02р5/00. Регулятор частоты вращения коленчатого вала / – № 2001042498; Заявл. 13.04.2001; опубл. 15.10.2002, Бюл. № 10. (Украина).
13. Чекаменев в.В. 2001. Рациональное использование тракторов в составе машинно-тракторных агрегатов путем уменьшения цикловой подачи топлива // Сборник научных трудов. – Каменец-Подольский. ПДАТА. Вип. 9. 458 – 461. (Украина).
14. Чекаменев в.В. 2005. Повышение загрузки дизеля путем бесступенчатого регулирования его мощности при неизменяемой частоте вращения коленчатого вала.// Вестник Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко. „Технический сервис АПК, техника и технологии в сельскохозяйственном машиностроении”. – Харьков. Вип.. 40. 366-374. (Украина).
15. Антипин В.П., Шевцов А.А. 1986. Характер влияния мощности двигателя на расход топлива в неустановившемся режиме// Двигателестроение – №10. 45, 46.
16. Агеев Л.Е. 1978. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов – Л.: Колос. 296.
17. Юшин А.А., Евтенко В.Г., Вернигор В.А. 1973. Исследование на математической модели показателей работы тракторного двигателя// Тракторы и сельхозмашины – №11.
18. Блаженев Е.И., Лаптев В.Р. 1980. А. С. 909253 СССР, МКИ 02 Д 1/10 Всережимный регулятор частоты вращения для двигателя внутреннего сгорания/ – № 2923668/25-06; Заявлено 14.05.80; Опубл. 23.11.80, Бюл. 43. 6.
19. Долганов К.Е., Каньковский И.Е., Романюк В.И., Остапенко Г.И., Головчук А.Ф. 1984. А. С. 1082975 СССР, МКИ<sup>3</sup> 02 Д 1/04 Регулятор частоты вращения двигателя внутреннего сгорания/ – № 3553671/26-06; Заявлено 17.02.83; Опубл. 30.03.84, Бюл. № 12. 5.
20. Захарчук В.И., Романюк В.И.. 1992. А. С. 1778339 (СССР) Регулятор частоты вращения двигателя внутреннего сгорания/ – № 4861539/06; Заявлено 20.08.90; Опубл. в Б. И., № 44.
21. Filippov A., Beshun A., Gerasimchuk Yu., Gluhovska O., Evchenko L. 2005. Динамика дизельного ДРЦ (двигателя с регулированием мощности отключением отдельных рабочих циклов)// MOTROL: Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. – Lublin. –Т. 7. 83-91.
22. Izdebski W., Skudlarski J., Zajac S. 2012, Hierarchy of influence of modern technical solutions used in agricultural tractors on the effectiveness of their work// ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture – Vol. 12, No.2, 73–76.
23. Герасимчук Ю. 2013. Исследование рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания по параметрам токсичности// MOTROL: Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. – Lublin – № 3.
24. Чуба В., Голуб Г. 2013. Экологические показатели работы двигателя Д-65Н на дизельном биотопливе // MOTROL: Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. – Lublin – № 4.
25. Zaharchuk V., Plizga K. 2004. Математическая модель для исследования факторов на экономические и экологические показатели колесного трактора// MOTROL Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa 6: 282-286.
26. Klets D. 2013. Modelling of mobile vehicle skid in traction movement mode// MOTROL: Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. – Lublin – № 7.
27. Żebrowski Z., 2005. Modelling and simulation tests of switching on front drive axle at farm tractor. ТЕКА. Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa 5: 254-261.
28. Yakovenko A., Doroshenko L., Plizga K. 2004. Оптимизация режимов работы машинно-тракторных агрегатов// MOTROL Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa 6: 317-323.
29. Yakovenko A., Pietrov L., Sosnowski S. 2005. The possibilities of Caterpillar tractor towards energy-sowing.// ТЕКА Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa 5: 240-247.

#### THE OPTIMIZATION WORK OF DIESELS OF AGRICULTURAL MACHINES AND TRACTORS

**Summary.** The effect of non-permanent loads from the side of executive mechanisms on a diesel is analyzed in the article. One of the ways to diminish of these influences is to choose the system and method of his adjusting and this method is shown. The basic requirements to the diesel with the purpose of his optimization in such terms of work are analyzed. Considering this basic executive functions are formed for work of regulator and his management.

As is generally known, the variable loads, which diminish of his middle power and overrun of fuel operate on a diesel, affect from the side of executive mechanisms. Scientists and researchers pay enormous attention to research the influences of these loadings to work of engines (in particular diesel), and also optimization of their work [1-8, 15-17].

Inconstant vibrations affect on the regulators and fuel giving systems of diesel that is why the main attention is paid to the regulators and adjusting methods [12, 18-20].

Harmonic vibrations of the set frequency can be used for the design of the inconstant loadings on stands, and also for a mathematical design and it can be seen from the analysis of the different graphs of reactions of resistance of machines and mechanisms. An analysis was conducted by the methods of mathematical analysis and statistics.

Real terms for the adjusting the diesel, at which the specific expense of fuel will correspond or less than nominal, make a range from  $0,5N_e$  to  $N_e$ . On this area for diminishing of influence of the inconstant loading speed description of adjusting must have a hyperbolic form. In addition, in these limits a regulator of power must have an independent management of the correction of sequencing serve of fuel.

**Key words:** diesel, withstand loading, adjusting, regulator, management.