

И. П. Завадский

## РАСЧЕТ АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ НА АВМ

Замечено, что тракторные дизели при работе в условиях эксплуатации менее экономичны, чем при испытании в лаборатории на тормозном стенде. Это происходит потому, что нагрузка на двигатель при его работе на тормозном стенде сохраняется в течение опыта неизменной, в то время как в условиях эксплуатации при выполнении трактором практически любых сельскохозяйственных работ она непостоянна.

Нестатичность нагрузки на двигатель влияет в общем случае на все его выходные параметры и, следовательно, на параметры рабочего процесса в целом. Зависимости между параметрами, характеризующими переменную нагрузку, и параметрами двигателя сложны и требуют длительного изучения. Однако по результатам исследований как наших, так и зарубежных ученых можно сделать вывод, что основные причины ухудшения эффективных показателей двигателя на переменных нагрузках — колебания угловой скорости коленчатого вала.

Изменения нагрузки, происходящие с достаточно большой частотой, преодолеваются за счет кинетической энергии движущихся частей кривошипно-шатунного механизма (в основном маховика) со сравнительно малыми колебаниями угловой скорости. В этом случае следует ожидать, что работа двигателя не будет заметно отличаться от его работы на стенде в условиях постоянной нагрузки, так как регулятор не будет успевать реагировать на изменение нагрузки.

Более медленные изменения нагрузки приводят к значительным колебаниям угловой скорости коленчатого вала двигателя, что вызывает срабатывание автоматического регулятора и изменение подачи топлива. В этом случае преодоление возросшей нагрузки происходит как за счет кинетической энергии подвижных элементов двигателя, так и за счет возрастания мощности вследствие увеличения подачи топлива. При этом двигатель периодически переводится на режим с повышенным расходом топлива, что и служит

причиной снижения топливной экономичности. Снижение экономичности можно объяснить и возможным уменьшением наполнения двигателя, поскольку дополнительные колебания воздушного потока, вызванные колебаниями угловой скорости, могут значительно увеличить гидравлические сопротивления воздушного тракта и сопутствующие этому потери. Но, к сожалению, до настоящего времени в результатах исследований по этим вопросам зачастую содержатся противоречивые данные.

Цель настоящего исследования — выявить влияние параметров, характеризующих переменную нагрузку, на изменение угловой скорости коленчатого вала двигателя.

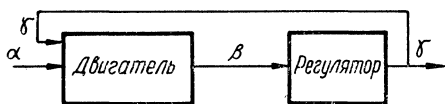


Рис. 1. Структурная схема двигателя

Такими параметрами в первую очередь являются частота изменения нагрузки, относительная величина этого изменения (глубина модуляции или степень неравномерности) при постоянном среднем ее значении и форма закона изменения нагрузки.

Отечественная практика исследования работы тракторных двигателей при переменных нагрузках определила в основном два направления: исследования в естественных условиях эксплуатации и исследования на специальных лабораторных стендах, позволяющих осуществлять имитацию естественных условий нагружения двигателя. Однако такие исследования требуют специальной организации эксперимента и всегда связаны со значительными затратами времени и средств. Поэтому нами в основу исследования был положен метод математического моделирования с последующим решением модели на аналоговой вычислительной машине.

В силу того, что тракторный двигатель в период эксплуатации работает в основном на регуляторе, структурная схема взаимодействия элементов двигателя в неустановившемся режиме была принята в виде, представленном на рис. 1.

В этой схеме входной величиной (координатой), вызывающей неустановившийся режим двигателя, является  $\alpha$  — момент сопротивления тракторному двигателю. На изменение входной величины  $\alpha$  двигатель реагирует изменением выходного параметра  $\beta$  — угловой скорости. Последняя, являясь входной координатой для регулятора, влечет за собой изменение его выходной координаты  $\gamma$  — положения рейки топливного насоса и тем самым цикловой подачи. Изменение выходной координаты регулятора через обратную связь вызовет соответствующее изменение выходной координаты двигателя. Таким образом, принятая схема взаимодействия элементов двигателя в неустановившемся режиме, вызываемом изменением момента сопротивления, вполне отражает действительную работу тракторного двигателя в эксплуатационных условиях.

Поскольку структурно двигатель представлен двумя элементами, то для определения математической модели в первом приближении достаточно двух уравнений, каждое из которых определяет движение (поведение) данного элемента в неустановившемся режиме.

Уравнением, определяющим неустановившийся режим двигателя, является основное уравнение движения двигателя:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_c, \quad (1)$$

где  $I$  — приведенный момент инерции подвижных частей двигателя;  $\omega$  — угловая скорость коленчатого вала двигателя;  $M_e$  — текущие значения эффективного момента двигателя;  $M_c$  — текущие значения момента сопротивления, приведенного к коленчатому валу двигателя.

Уравнением, определяющим неустановившийся режим регулятора, является уравнение движения муфты регулятора:

$$\mu \frac{d^2z}{dt^2} + \vartheta \frac{dz}{dt} + E(z) + F = A(z)\omega_p^2, \quad (2)$$

где  $\mu$  — приведенная к муфте масса подвижных частей регулятора;  $\vartheta$  — коэффициент демпфирования (коэффициент трения или фактор торможения);  $F$  — усилие предварительного натяжения пружины;  $F(z) = cz$  — приведенная сила пружины регулятора;  $c$  — жесткость пружины;  $z$  — перемещение муфты регулятора;  $A(z)$  — коэффициент центробежной (поддерживающей или восстанавливающей) силы;  $\omega_p$  — угловая скорость вала регулятора.

Объектом настоящего исследования являлся тракторный дизель Д-50 Минского моторного завода, устанавливаемый на колесных тракторах общего назначения класса 1,4 т Минского тракторного завода МТЗ-50 «Беларусь». Исследовались случаи работы двигателя на этом тракторе на первой передаче, на пятой и при работе с балансирной машиной постоянного тока, в соответствии с чем уравнение движения двигателя приводилось к расчетному виду.

Момент инерции подвижных частей трактора для первой и пятой передач определялся по известной методике и приводился к коленчатому валу двигателя с учетом передаточных чисел соответствующих ступеней трансмиссии трактора. Момент инерции ротора балансирной машины определялся по известной формуле через маховый момент ротора. Момент инерции машины-орудия не учитывался. Значения моментов инерции найдены равными: на первой передаче — 0,166 кгм·сек<sup>2</sup>; на пятой — 0,219 кгм·сек<sup>2</sup> и с балансирной машиной — 0,41 кгм·сек<sup>2</sup>. Уравнение движения муфты регулятора приводилось к расчетному виду в соответствии с методикой [2].

В результате этого математическая модель тракторного дизеля определилась в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = A_1(M_e - M_c); \\ \frac{dz}{dt} = A_2 z + A_3 z \omega^2 + A_4 \omega^2 + A_5, \end{cases} \quad (3)$$

где  $A_1 = 6,0 \text{ (кгм}\cdot\text{сек}^2)^{-1}$  — для работы на первой передаче;  $A_1 = 4,56 \text{ (кгм}\cdot\text{сек}^2)^{-1}$  — для работы на пятой передаче;  $A_1 = 2,44 \text{ (кгм}\cdot\text{сек}^2)^{-1}$  — для работы с балансирной машиной;  $A_2 = -7,63 \text{ сек}^{-1}$ ;  $A_3 = 1,16 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$ ;  $A_4 = 3,44 \cdot 10^{-6} \text{ м/сек}$ ;  $A_5 = -0,1 \text{ м/сек}$ .

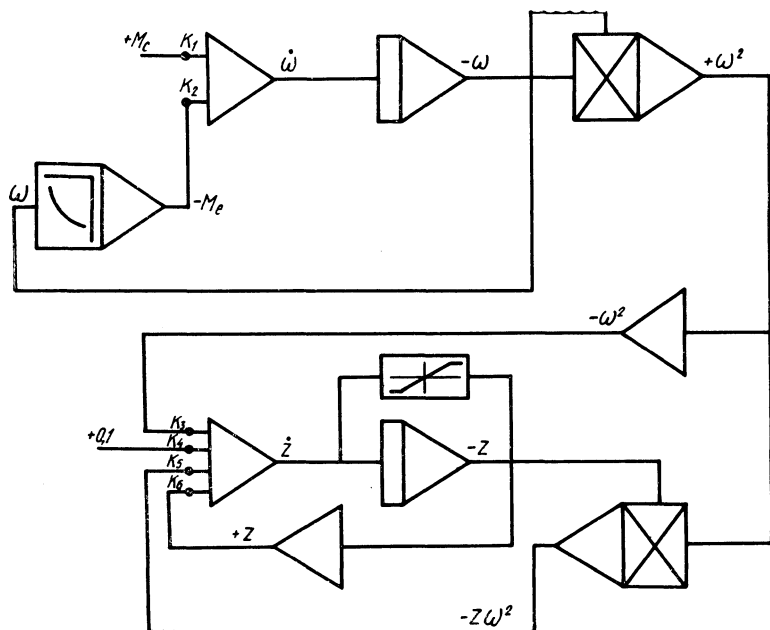


Рис. 2. Блок-схема решения математической модели дизеля на АВМ

Блок-схема решения системы на аналоговой вычислительной машине МН-7 приведена на рис. 2.

Эффективный момент двигателя вводился в машину блоком нелинейности БН-10 по экспериментальной регуляторной характеристике. Характеристика была снята при следующей регулировке топливного насоса при  $t = 20^\circ\text{C}$  ( $q$  — цикловая подача;  $q_p$  — средняя цикловая подача;  $\delta_T$  — степень неравномерности цикловых подач по цилиндрам):

№ секций	I	II	III	IV	$q_{\text{ср}}, \text{мл}$	$\delta_T, \%$
$q, \text{мл}$	63	64	64	62,5	63,4	2,36

Для ввода в машину кривая эффективного момента двигателя по регуляторной характеристике была аппроксимирована ломаной линией из четырех участков согласно рис. 3. Максимальная ошибка аппроксимации составила 1,3%.

Анализ колебаний угловой скорости проводился для случаев симметричного изменения момента сопротивления (рис. 4, а, б, в),

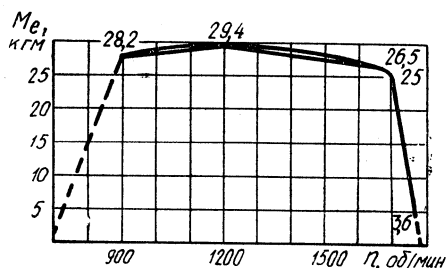


Рис. 3. Аппроксимация кривой крутящего момента дизеля для ввода в аналоговую машину

степень неравномерности которого поэтому может быть определена из следующего выражения:

$$\delta_M = \frac{M_{c \max} - M_{c \min}}{M_{c \text{cp}}}, \quad (4)$$

где  $M_{c \max}$  и  $M_{c \min}$  — максимальное и минимальное значения момента сопротивления;  $M_{c \text{cp}}$  — среднее значение (постоянная составляющая) момента сопротивления, которое может быть выражено следующим образом:

$$M_{c \text{cp}} = \frac{M_{c \max} + M_{c \min}}{2}. \quad (5)$$

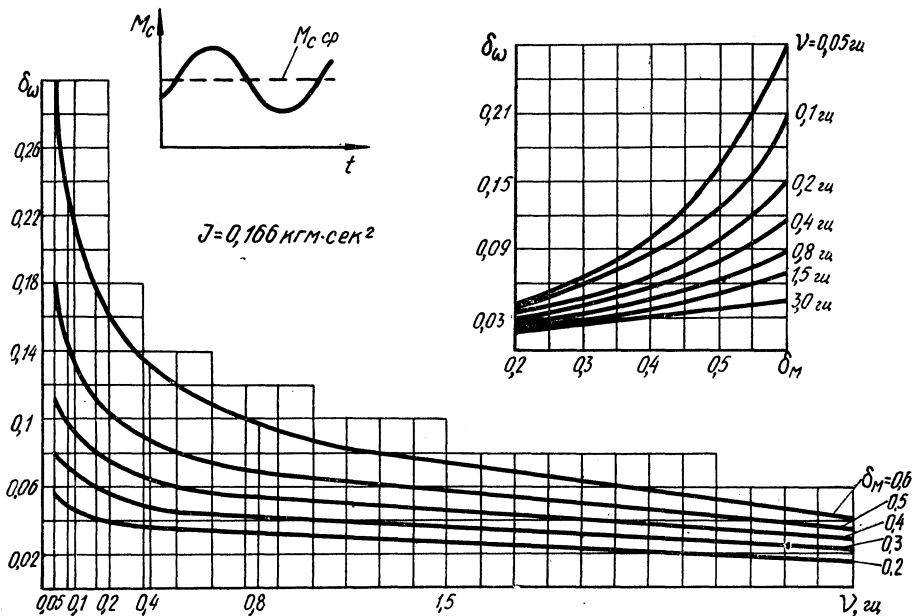
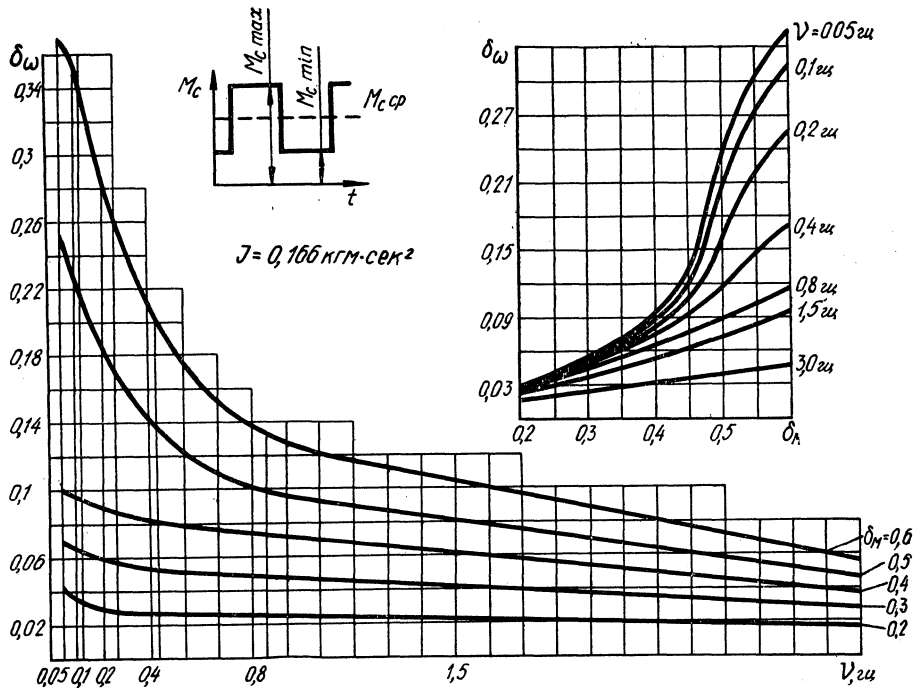
При проектировании машинотракторных агрегатов непостоянство момента сопротивления учитывается коэффициентом использования мощности двигателя. Для обеспечения необходимого уровня тягово-динамических качеств машинотракторному агрегату величина этого коэффициента принимается равной 0,7—0,8, т. е. из расчета, что двигатель загружается на 70—80% от его номинальной мощности. Поэтому среднее значение момента сопротивления было получено из экспериментальной кривой крутящего момента двигателя по регуляторной характеристике:

$$M_{c \text{cp}} = 0,75 M_{e \text{ном}} = 0,75 \cdot 25 = 18,75 \text{ кГм.}$$

Решая совместно уравнения 4 и 5, можно получить значения  $M_{c \max}$  и  $M_{c \min}$  в зависимости от принятой степени неравномерности  $\delta_M$ :

$$M_{c \max} = M_{c \text{cp}} \left( 1 + \frac{\delta_M}{2} \right); \quad (6)$$

$$M_{c \min} = M_{c \text{cp}} \left( 1 - \frac{\delta_M}{2} \right).$$



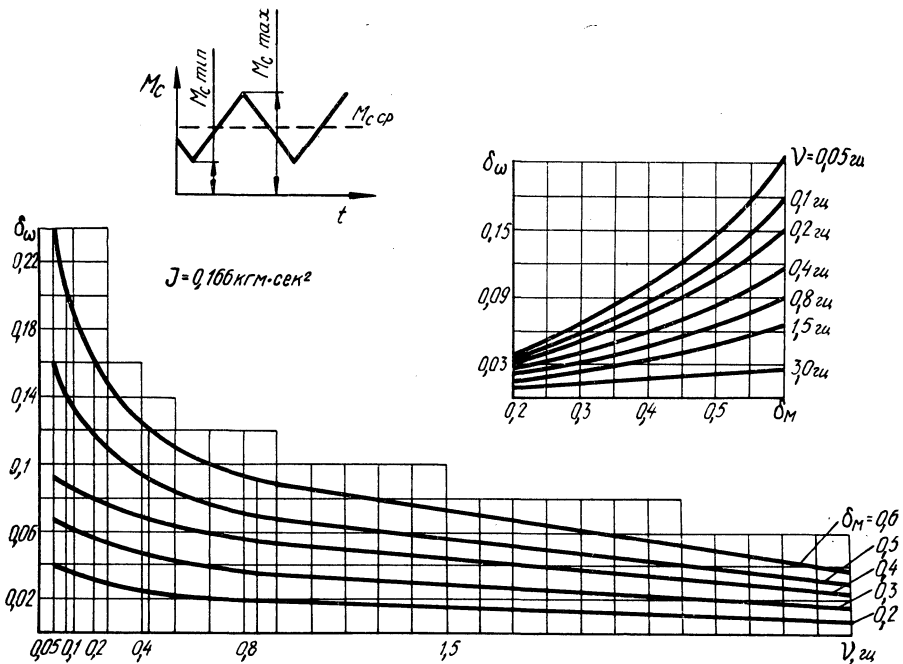


Рис. 4. Амплитудные характеристики дизеля при работе на первой передаче

Решение задачи для указанных трех случаев работы двигателя проводилось для  $\delta_m = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$ . Причем частота изменения момента сопротивления для всех степеней неравномерности и законов его изменения устанавливалась в пределах от 0,05 до 3,0 гц ступенями примерно по геометрической прогрессии. Момент сопротивления вводился в аналоговую машину

низкочастотным генератором периодических колебаний типа НГПК-3М. Образец осциллограммы решения задачи приведен на рис. 5. Из такой осциллограммы определялась частота  $\nu$ , степень неравномерности момента сопротивления  $\delta_m$  и величина изменения угловой скорости  $\Delta\omega$ . По результатам решения построены зависимости колебаний угловой скорости коленчатого вала двигателя, выраженные степенью неравномерности хода двигателя:

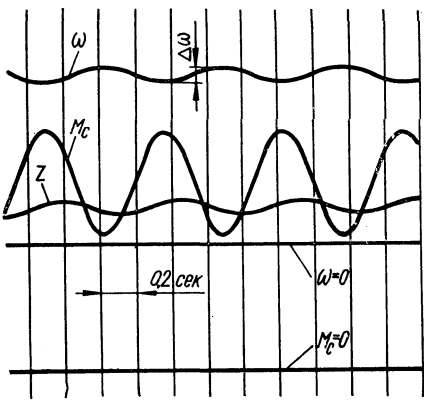
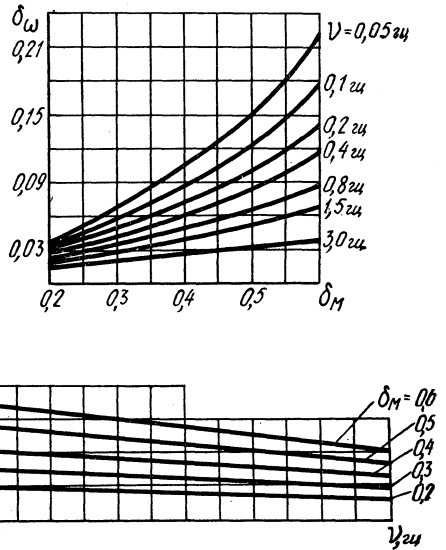
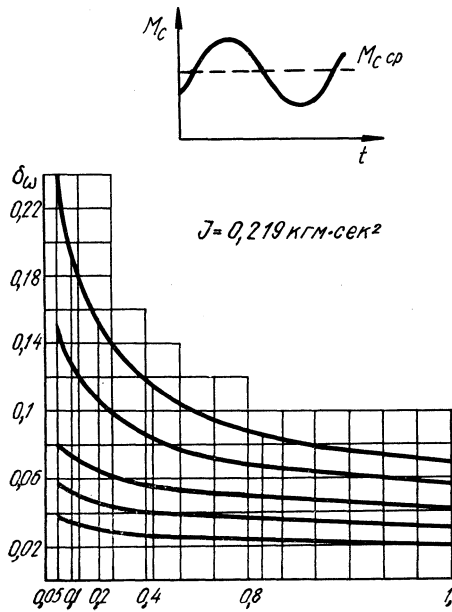
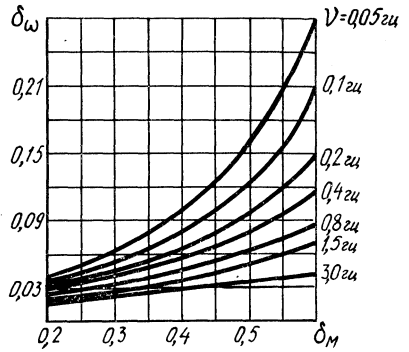
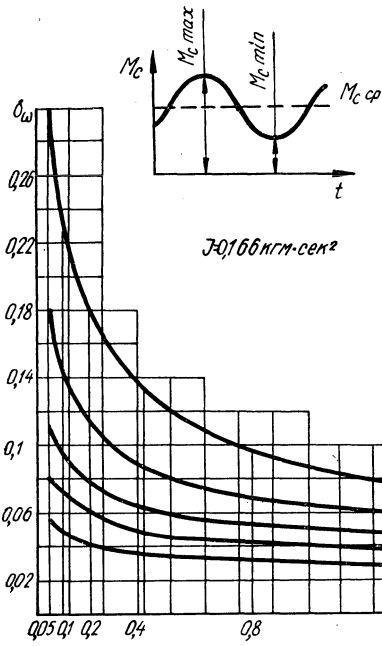


Рис. 5. Образец осциллограммы решения модели на АВМ

$$\delta_{\omega} = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{cp}} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{cp}}$$





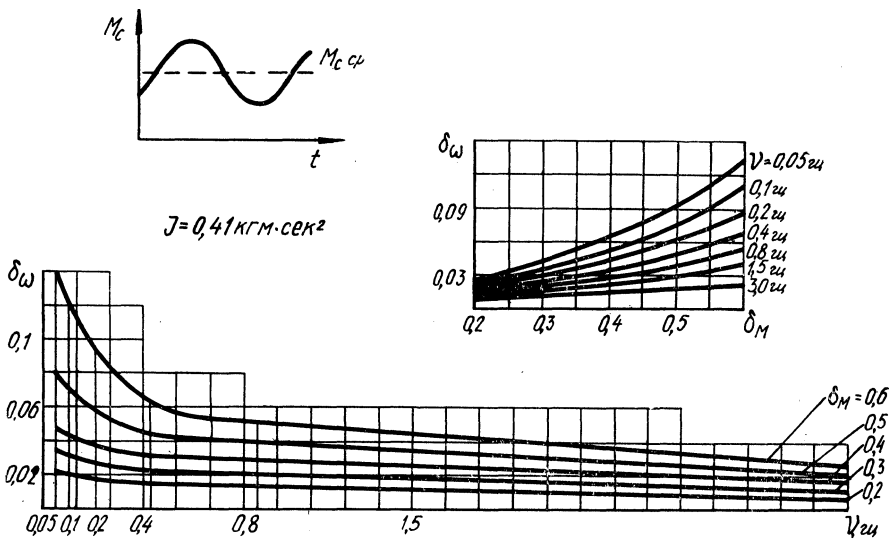


Рис. 6. Амплитудные характеристики дизеля при работе:

*a* — на первой передаче; *б* — на пятой передаче; *в* — с балансирной машиной постоянного тока

в функции степени неравномерности и частоты изменения момента сопротивления.

Анализ этих зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

1. Наиболее сильное влияние на неравномерность хода двигателя  $\delta_\omega$  оказывает неравномерность нагрузки  $\delta_M$  в области малых частот — 0,8 гц и ниже. Причем, чем больше степень неравномерности момента сопротивления, тем до более высоких частот сказывается ее действие на колебания угловой скорости.

2. Частоты изменения момента сопротивления выше 1,5 гц практически не воспринимаются двигателем и не могут вызывать значительных колебаний угловой скорости, способных повлечь за собой существенные изменения выходных параметров двигателя (рис. 4, *a*, *б*, *в* и рис. 6, *a*, *б*, *в*).

3. С увеличением момента инерции подвижных частей системы «двигатель — трактор» в 2 раза неравномерность хода двигателя уменьшается во всем диапазоне частот и степеней неравномерности момента сопротивления примерно во столько же раз (рис. 6, *a*, *б*, *в*).

### Л и т е р а т у р а

[1] Крутов В. И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. М., 1968. [2] Малиновский Е. Ю., Зарецкий Л. Б. Математическое моделирование в исследовании строительных машин. М., 1966.