

ИЗМЕНЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ДИЗЕЛЯ ПРИ ПРИЕМЕ НАГРУЗКИ

В.М. Капитанский, инж.-мех.

Рассмотрено изменение рабочих параметров стационарных и транспортных дизелей в переходных процессах приема нагрузки и разгона под нагрузкой. Даны рекомендации по максимально допустимым значениям наброса нагрузки для дизель-генераторов с различными системами наддува и рациональным режимам разгона главных судовых дизелей.

Под рабочими параметрами в переходных процессах разгона или приема нагрузки дизеля понимаются зависимости от частоты вращения или мощности, среднего эффективного давления, крутящего момента, давления наддува и т. д.

В существующих многочисленных публикациях имеют место некоторые неточности в описании характеристик переходных процессов, мешающие потребителям правильно ориентироваться в вопросах организации процесса нагружения дизельных установок, а производителям, в ряде случаев, обоснованно задавать требования в отношении порядка их нагружения.

В настоящей публикации сделана попытка уточнения характера протекания переходных процессов.

С точки зрения особенностей приема нагрузки дизели можно разделить на две основные группы:

- стационарные дизели для привода дизель-генераторов, отличительной особенностью которых является работа при практически постоянной (в пределах степени неравномерности регулятора частоты вращения) частоте вращения коленчатого вала;

- транспортные дизели (судовые, тепловозные, автотранспортные и т. п.), работающие во всем поле эксплуатационных нагрузок и частот вращения коленчатого вала.

Рассмотрим особенности нагружения (приема нагрузки) этими группами дизелей. Степень нагружения или иначе величину наброса нагрузки представим в виде относительных параметров, т. е. в виде отношения их абсолютных текущих значений к номинальным или полным значениям крутящего момента T_{iq}' , а для дизельгенераторных установок — к номинальному

значению эффективной мощности P_e' . Частоту вращения тоже представим в относительных величинах n' .

Отметим, что количество топлива, которое может быть сожжено в цилиндрах дизеля для совершения работы, определяется зарядом воздуха, величина которого зависит главным образом от давления наддува [1], т. е. давления, под которым воздух подается в цилиндры p_{int} . Исходя из соображений экологической безопасности и для исключения излишних тепловых нагрузок при набросах нагрузки целесообразно не допускать снижения коэффициента избытка воздуха для сгорания более чем на 10 % по отношению к режиму номинальной (полной) мощности.

Дизели для привода генераторов

Дизели без наддува или с приводным нагнетателем (механическим или турбокомпрессором) характеризуются постоянным давлением наддува в пределах нагрузочной характеристики. Это обеспечивает возможность наброса практически любой нагрузки, вплоть до максимальной.

Дизели со свободным турбокомпрессором (СТК) в зависимости от нагрузки характеризуются переменным давлением наддувочного воздуха. На режиме холостого хода оно близко к давлению окружающей среды. Соответственно дизели с СТК в состоянии принимать при набросе только частичную нагрузку.

Дизели с двухступенчатой схемой наддува занимают промежуточное положение между двумя вышеуказанными группами.

С учетом вышеизложенных ограничений на рис. 1 приведен график максимально допустимых относительных величин набросов нагрузки на дизель из режима холостого хода при давлениях наддува на номинальном режиме до 0,4 МПа. Для дизелей с СТК можно также пользоваться данными, приведенными в ГОСТ 10511–83.

Степени нагружения дизеля при его работе на долевых нагрузках P_e' не должны превышать указанных на рис. 1 с учетом имеющегося запаса мощности от начального режима нагружения до номинального.

Для дизелей с СТК с учетом рекомендаций [1] может быть построен график выбора ступеней нагружения P_e' в зависимости от развиваемой дизелем мощности P_{en}' на начальном долевом

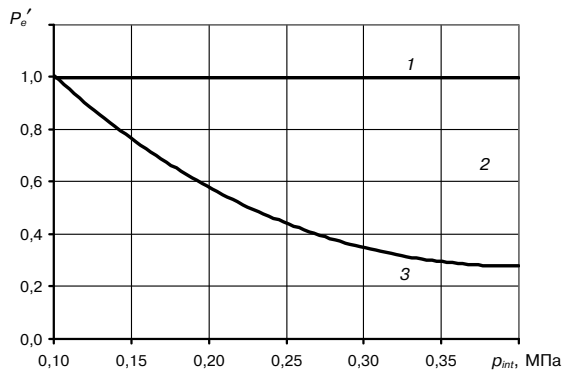


Рис. 1. Значения максимально допустимых набросов нагрузки на электроагрегат с ДВС из режима холостого хода:

1 — дизели без наддува или с приводным нагнетателем; 2 — область допустимых нагрузок для дизелей с двухступенчатым наддувом (СТК и приводной нагнетатель); 3 — дизели с СТК

режиме, аналогичный приведенному на рис. 2 применительно к дизелям с давлением наддува до 0,2 МПа.

Следует отметить, что ГОСТ 10511–83, оговаривая величины допустимых набросов нагрузки, задает их только из режима холостого хода и не увязывает их с особенностями системы наддува дизеля. Стандарт также не содержит никаких указаний, связывающих допустимые величины наброса нагрузки с развиваемой дизелем мощностью в начале переходного процесса. Таким образом, в существующем виде этот стандарт не отражает всех особенностей нагружения дизеля и в этом смысле нуждается в существенной корректировке.

На рис. 3 приведен пример графика рекомендуемого ступенчатого нагружения дизель-генератора с СТК, построенного на основании данных рис. 2. Первая ступень нагружения не должна превышать наброс в 50 % из режима холостого хода, а последующие ступени являются максимально допустимыми для соответствующих долевых режимов. После каждой ступени нагру-

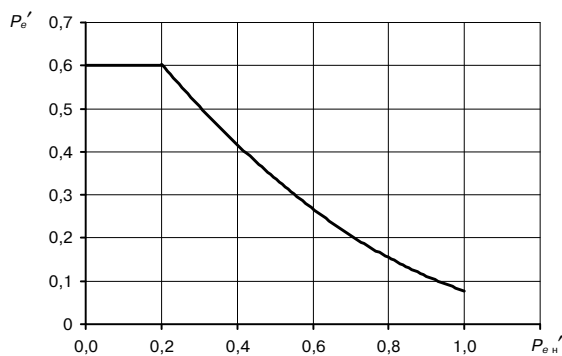


Рис. 2. Значения допустимых набросов нагрузки на дизель-генератор с СТК в зависимости от начальной мощности переходного процесса

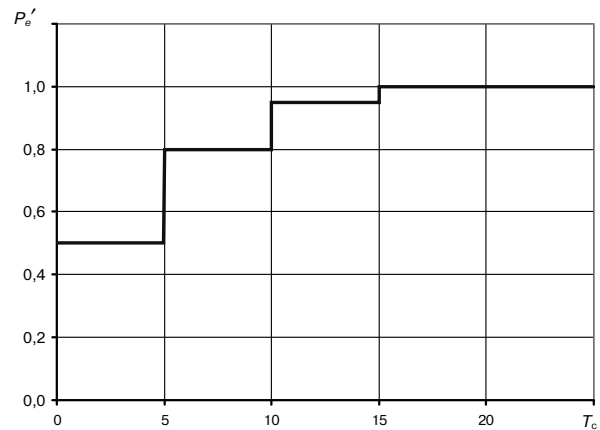


Рис. 3. Рекомендуемый график нагружения дизель-генератора с СТК (давление наддува на номинальном режиме 0,2 МПа)

жения необходима выдержка продолжительностью не менее 5–6 с для стабилизации режима дизель-генератора (в основном стабилизации частоты вращения). Потребителю рекомендуется придерживаться приведенного графика нагружения дизель-генератора для обеспечения его надежной и бесперебойной работы.

Дизели для транспортных установок

Величины допустимых набросов нагрузки для этой группы дизелей зависят от частоты вращения коленчатого вала в начале переходного процесса от характеристики изменения внешней нагрузки. На рис. 4 приведены графики максимально допустимых значений набросов нагрузки в зависимости от частоты вращения коленчатого вала судового дизеля при давлении наддува 0,2 МПа на режиме полной мощности (используя аппарат [1] такой график можно построить для любого транспортного дизеля). Здесь же в качестве примера приведен график внеш-

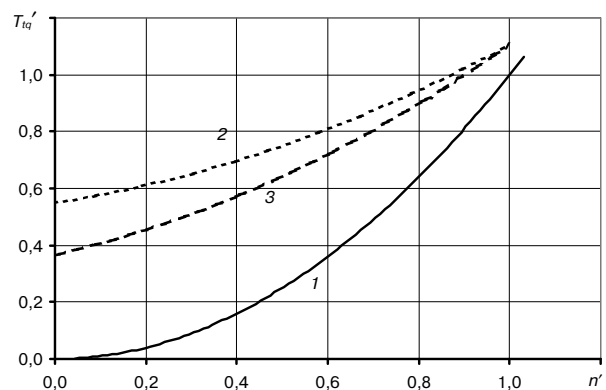


Рис. 4. Значения допустимых набросов нагрузки на судовую дизель с СТК:

1 — винтовая характеристика; 2 — ограничительная (по давлению наддува) характеристика; 3 — внешняя скоростная характеристика

ней нагрузки для судового дизеля (винтовая характеристика).

Разность значений нагрузок между кривыми 2 (или 3) и 1 показывает допустимый уровень набросов нагрузки для каждого из режимов винтовой характеристики судового дизеля, а разность значений нагрузок между кривыми 2, 3 и осью n' — допустимый уровень набросов нагрузки для транспортных средств из режима холостого хода.

В соответствии с назначением конкретных дизелей кривая 3 является графиком работы автоматических ограничителей нагрузки. Для дизелей этой группы, по-видимому, наиболее оптимальным является ограничение нагрузки по давлению наддува.

Переходный процесс при набросе нагрузки

Наибольший интерес представляют переходные процессы при увеличении (набросе) нагрузки. Здесь следует различать два вида изменения нагрузки, а именно:

- при изменении задания по частоте вращения коленчатого вала;
- при увеличении (набросе) внешней нагрузки и практически постоянной частоте вращения коленчатого вала.

Переходный процесс при увеличении задания частоты вращения коленчатого вала

На рис. 5 показан переходный процесс при увеличении задания частоты вращения коленчатого вала судового дизеля, снабженного всережимным регулятором частоты вращения и автоматическим ограничителем нагрузки по давлению надвучного воздуха. В данном случае характер переходного процесса будет существенно зависеть от скорости задания режима работы дизеля системой управления.

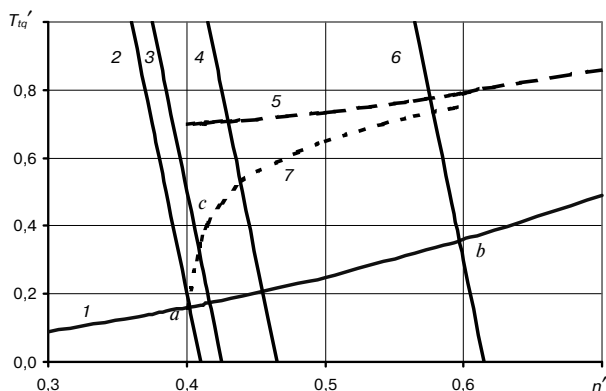


Рис. 5. Переходный процесс при увеличении задания частоты вращения дизеля:

1 — винтовая характеристика; 2, 3, 4, 6 — исходная, промежуточные и конечная регуляторные характеристики; 5 — характеристика ограничения нагрузки; 7 — максимально развиваемый дизелем крутящий момент при $\mu < 1$ (вариант)

Начальный режим (точка a) находится на пересечении винтовой характеристики 1 и начальной регуляторной характеристикой 2; заданный новый режим (точка b) — на пересечении той же винтовой характеристики 1 с регуляторной характеристикой 6, соответствующей новому заданию.

Скорость задания режима работы дизеля наглядно характеризуется отношением скорости изменения частоты вращения гребного винта к скорости изменения задаваемой частоты вращения дизеля за один и тот же промежуток времени. В качестве параметров этих скоростей удобно и наглядно принять степень изменения частоты вращения гребного вала σ и соответствующее за тот же промежуток времени изменение задания режима на величину, равную степени неравномерности регулятора δ . Переходный процесс в данном случае будет характеризоваться отношением $\mu = \sigma/\delta$.

При $\mu = 1$ момент дизеля равен потребляемому винтом, поэтому разгон установки, а следовательно, и изменение режима невозможны.

При $\mu = 0$, что соответствует инерционным нагруженным судам, нагрузка дизеля практически мгновенно достигнет ограничительного уровня (кривая 5). В этом случае будет обеспечен разгон судна при максимальном избытке крутящего момента. После достижения частоты вращения дизеля заданного значения момент начнет уменьшаться по регуляторной характеристике 6 до прихода всей силовой установки в точку b , соответствующего новому заданному установившемуся режиму.

Наконец, при $0 < \mu < 1$ изменения нагрузки в переходном процессе будут меньшими, чем в указанном выше случае, и тем меньше, чем больше значение μ . Переходный процесс в этом случае протекает следующим образом. Сначала при практически неизменной частоте вращения гребного вала изменяется на небольшую величину задание частоты вращения дизеля (регуляторная характеристика 3). Положение точки c на регуляторной характеристике 3 показывает, что развиваемый дизелем крутящий момент не достигает максимального значения и таким образом переходный процесс осуществляется по кривой 7. Такие переходные процессы характерны для легких (быстроходных глиссирующих) судов с системой управления ограничения скорости задания режима. Однако следует отметить, что наличие в системе управления ограничительных характеристик ограничивают скорость разгона судна (и любого другого транспортного средства).

Во всех рассматриваемых случаях завершение переходного процесса пройдет, как указывалось выше, по регуляторной характеристике 6.

Отметим, что разгон судна начнется при некотором утяжелении винтовой характеристики, приближении ее к швартовной. По мере разгона и выхода на заданный скоростной режим система возвращается в новое равновесное состояние, соответствующее стационарной винтовой характеристике. Разгон силовой установки и судна в целом обеспечивается за счет избытка развиваемого дизелем крутящего момента T_{iq} , необходимого для преодоления внешнего сопротивления движению судна T_c и момента инерции судна T_k . Таким образом, в течение переходного процесса имеет место следующее равенство моментов :

$$T_{iq} = T_c + T_k.$$

Переходный процесс при набросе внешней нагрузки

На рис. 6 приведен типичный переходный процесс при набросе внешней нагрузки на дизель-генератор (или на дизель, работающий при заданной частоте вращения).

Исходный установившийся режим — точка *a* на пересечении регуляторной характеристики 4 с кривой, соответствующей исходному постоянному моменту 1. Конечный установившийся режим после наброса нагрузки — точка *b* на пересечении регуляторной характеристики 4 с кривой, соответствующей конечному постоянному моменту 2. Кривая 3 — крутящий момент, соответствующий ограничению подачи топлива на исходном режиме работы.

При набросе внешняя нагрузка изменяется по кривой 5, достигая значений которые могут превышать момент допускаемый ограничителем подачи топлива. Под действием внешней нагрузки частота вращения дизеля снижается до точки *c* на кривой 1 в пределах допускаемого системой

регулирования провала частоты. Это приведет к увеличению регулятором цикловой подачи топлива до значения, соответствующего ограничительной характеристике (кривая 3). За счет совместного увеличения развиваемого дизелем момента и частичного использования кинетической энергии вращающихся масс дизеля и генератора частота вращения дизель-генератора начнет увеличиваться до значения, соответствующего точке *f* (на пересечении кривой 3 с характеристикой 4). Далее по регуляторной характеристике дизель-генератор перейдет в точку *b*, соответствующую значению нового установившегося режима. Отметим еще раз, что для дизеля с СТК положение кривой 3 будет определяться настройкой ограничительной характеристики по давлению наддува. Очевидно, что в этом случае возможны лишь набросы частичной нагрузки как это было рассмотрено ранее. Для дизеля с приводным нагнетателем положение кривой 3 будет определяться максимально допустимым значением цикловой подачи топлива, что обеспечит более динамичный режим приема нагрузки и не ставит ограничений по величине наброса нагрузки вплоть до максимального значения.

Для данного переходного режима равенство действующих моментов будет иметь следующий вид:

$$T_{iq} + T_k = T_c.$$

Таким образом, переходный процесс осуществляется за счет избытка энергии дизеля (площадь между кривыми 1 и 3) и накопленной кинетической энергии дизель-генератора (площадь над кривой 3).

Оценка значений максимально допустимых бросков нагрузки

Под максимально допустимыми понимаются кратковременные (мгновенные) броски нагрузки, превышающие по своей величине значения установленные ограничителями нагрузки. Максимально допустимый бросок нагрузки определяется заданием ограничителя нагрузки и кинетической энергией дизель-генератора и может быть рассчитан по известным физическим зависимостям. Ниже в таблице приведены в качестве примера значения допустимого мгновенного броска нагрузки при относительном изменении частоты вращения при броске, равном 0,05, времени разгона агрегата $T_c = 2$ с и различных значениях относительной продолжительности провала частоты вращения при броске $\bar{\Delta\tau} = \Delta\tau/T_c$.

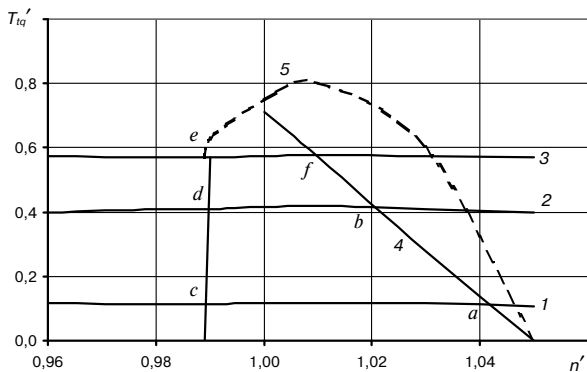


Рис. 6. Переходный процесс при мгновенном набросе нагрузки на дизель-генератор:

1 — постоянный момент, соответствующий исходному режиму; 2 — постоянный момент, соответствующий конечному режиму; 3 — постоянный момент, соответствующий ограничению подачи топлива на исходном режиме; 4 — заданная регуляторная характеристика; 5 — переходный процесс при изменении внешней нагрузки

$\bar{\Delta\tau}$	0,01	0,025	0,05	0,10
\bar{P}_d	4,75	1,90	0,95	0,475
$\bar{\Delta\tau}, \text{ с}$	0,02	0,05	0,10	0,20

В случаях, когда необходимо увеличить значение допустимого броска нагрузки, требуется либо применять агрегат большей мощности, либо повышать момент инерции агрегата введением соответствующего маховика.

Заключение

Рабочие характеристики стационарных и транспортных дизелей при работе на неустановившихся режимах и особенно переходных процессах разгона и приема нагрузки изучены все еще недостаточно, хотя доля их в эксплуатации значительно превышает продолжительность установившихся режимов. Эти режимы наиболее неблагоприятно влияют на все эксплуатационные показатели, в том числе на показатели экологической безопасности.

Рекомендации, приведенные в настоящей работе по организации рациональных режимов нагружения стационарных и транспортных дизелей в условиях эксплуатации дают возможность специалистам по обслуживанию не только существенно повысить их экономичность, надежность и ресурс работы, но и заметно сократить количество выбросов вредных веществ с отработавшими газами.

Литература

1. *Капитанский В.М.* Относительные параметры как универсальное средство описания рабочих процессов поршневых двигателей внутреннего сгорания. — СПб., 2004.

ЮБИЛЕЙ!

Виктору Александровичу Егорову 60 лет

8 октября 2009 г. исполнилось 60 лет Виктору Александровичу Егорову, крупному специалисту в области двигателестроения, председателю правления, генеральному директору ОАО РУМО, «Заслуженному машиностроителю РФ» члену редакционной коллегии журнала «Двигателестроение»



Вся трудовая деятельность Виктора Александровича Егорова связана с ОАО РУМО (ранее «Двигатель революции»), куда он пришел работать сразу после окончания школы в 1968 г. В 1979 г. окончил Горьковский институт инженеров водного транспорта по специальности «Судовые машины и механизмы».

Пройдя все ступени профессионального роста — от шлифовальщика до начальника производственно-диспетчерского отдела, в 1986 г. Виктор Александрович был назначен главным инженером завода. Стремление ко всему новому, а также любовь к профессии и привычка делать свою работу на совесть способствовали назначению на должность технического руководителя предприятия.

Уже через год, в июне 1987 г. приказом министра тяжелого и транспортного машиностроения СССР В.А. Егоров был назначен директором дизельного завода «Двигатель революции», а в 1993 г. на первом общем собрании акционеров Виктор Егоров был избран генеральным директором ОАО РУМО.

Работа в рыночных условиях потребовала постоянного совершенствования, повышения квалификации, изучения и внедрения современных подходов к управлению производством.

В 2004 г. приказом губернатора Нижегородской области за многолетний добросовестный труд и достижение высоких производственных показателей Виктору Егорову было присвоено звание «Заслуженный машиностроитель РФ».

Традиционно коллеги отзываются о Викторе Егорове как о технически грамотном специалисте и волевом руководителе, вклад которого в развитие ОАО РУМО значительный и многогранный.

Коллектив ОАО РУМО и редакция журнала «Двигателестроение» поздравляют Виктора Александровича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья и творческого долголетия