

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

**ВЫБОР ОБЛАСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
РЕЖИМОВ ГЛАВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
В СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ
С ВИНТОМ РЕГУЛИРУЕМОГО ШАГА**

Методические указания
к практическому занятию по дисциплине
«Эксплуатация дизельных энергетических установок»
для студентов, обучающихся по направлению
26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок»
очной и заочной форм обучения

Севастополь
СевГУ
2021

УДК 621.436.1-049.7:656.6(076.5)

ББК 39.455.5я73

В92

Р е ц е н з е н т :

В.А. Очеретяный - канд. техн. наук,
доцент кафедры ЭМСС

Составители: Г.В. Гоголев, В.А. Тимофеев

В92 Выбор области эксплуатационных режимов главных двигателей в судовых дизельных установках с винтом регулируемого шага : методические указания к практическому занятию по дисциплине «Эксплуатация дизельных энергетических установок» для студентов, обучающихся по направлению 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» очной и заочной форм обучения / Севастопольский государственный университет, Морской институт ; сост. Г. В. Гоголев, В. А. Тимофеев. – Севастополь : СевГУ, 2021. – 17 с. – Текст : электронный.

Описываются особенности эксплуатации, ограничения и режимы работы главных двигателей в составе СДУ с ВРШ.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета, морского института, специальности 26.05.06 – Эксплуатация судовых энергетических установок.

Выполнение практической работы направлено на изучение следующих профессионально-специализированных компетенций (Конвенция ПДНВ):

ПСК-9 – подготовка, эксплуатация, обнаружение неисправностей и меры, необходимые для предотвращения причинения повреждений механизмам и системам управления.

УДК 621.436.1-049.7:656.6(076.5)

ББК 39.455.5я73

Рассмотрено и рекомендовано кафедрой энергоустановок морских судов и сооружений Морского института Севастопольского госуниверситета в качестве методических указаний к выполнению практического занятия по дисциплине «Эксплуатация дизельных энергетических установок» для студентов направления 26.05.06 – Эксплуатация судовых энергетических установок, протокол № 1 от 31 августа 2018 г.

Допущено учебно-методическим центром СевГУ в качестве методических указаний

© Гоголев Г.В., Тимофеев В.А., сост., 2021

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Цель практического занятия.....	5
1. Определение нагрузки главного двигателя	5
2. Взаимодействие ГД с ВРШ	5
3. Выбор области эксплуатационных режимов ГД с ВРШ	7
4. Предотвращение перегрузки ГД, работающего с ВРШ	12
5. Порядок выполнения практического занятия.....	15
6. Требования к отчету.....	16
Литература.....	17

ВВЕДЕНИЕ

Выбор эксплуатационных режимов – важнейшее и ответственное решение, принимаемое старшим механиком по согласованию с капитаном. Оно должно быть своевременным и вырабатываться с учетом условий плавания, технического состояния главного двигателя и ВРШ, рейсового задания. При этом не допускается выбор режима, выходящего за рамки ограничительных характеристик. Необходимо правильно понимать соответствующую судовую техническую документацию, уметь самостоятельно назначать задание программы, по которой будет работать автоматический электронный регулятор нагрузки (АЭРН), контролировать отсутствие перегрузки ГД по соответствующим параметрам (положение топливной рейки, температуры выпускных газов, максимальное давление сгорания, среднее индикаторное и среднее эффективное давления).

ЦЕЛЬ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАНЯТИЯ

Целью практического занятия является приобретение студентами практических знаний в части эксплуатационных ограничений и назначения режимов работы, контроля, оценки и поддержания безопасной эксплуатации двигателя.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для приближенного суждения о нагрузке дизеля (до выполнения индицирования и при отсутствии торсиометра) следует использовать шкалы топливного рычага пульта управления, указателя нагрузки, положения выходного вала регулятора и реек топливных насосов, а также значения температура выпускных газов.

Эффективную мощность можно определить по формуле

$$N_e = \frac{M_{кр} \cdot n}{60 \cdot \eta_n},$$

где η_n – КПД передачи; n – частота вращения коленвала ГД, об/мин.

Крутящий момент определяется бесконтактным магнитным способом, используя магнитоупругий эффект, или геометрическим способом, измеряя угол закручивания определенного участка гребного вала при помощи индуктивных, емкостных тензометрических или оптических датчиков. Частота вращения успешно измеряется индукционными датчиками. Принцип действия указанных средств измерения рассмотрен в предыдущем методическом указании [1].

Нагрузку ГД можно оценить по ограничительной зависимости подачи топлива от частоты вращения гребного вала, зная значение частоты вращения.

2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВРШ

За счет изменения шагового отношения ВРШ зона возможных эксплуатационных режимов значительно расширяется. Эти возможности иллюстрируются на рис. 1.

Так, например, при $n = 0,6$ можно получить увеличение мощности за счет разворота лопастей гребного винта с $N_e = 0,26$ до $N_e = 0,63$. Однако следует отметить, что фактическая мощность будет несколько ниже, из-за ограничений по допустимой нагрузке, так как ограничительная характеристика будет проходить существенно ниже внешней номинальной.

Заштрихованная зона характеризует **дополнительные** возможности увеличения мощности ГД при той же частоте вращения, возникающие в установках с ВРШ.

Реальные эксплуатационные ограничительные характеристики проходят существенно ниже внешней характеристики номинальной мощности.

Снизу зона возможных режимов работы ГД с ВРШ будет ограничиваться линией нулевого упора ($H/D = 0$). При этом коленчатый вал двигателя и гребной вал будут вращаться, а судно будет оставаться неподвижным. Слева зона возможных режимов ограничивается регламентированной минимальной устойчивой частотой вращения двигателя, которое по правилам Регистра Российской Федерации равна 30 % от номинальной частоты вращения.

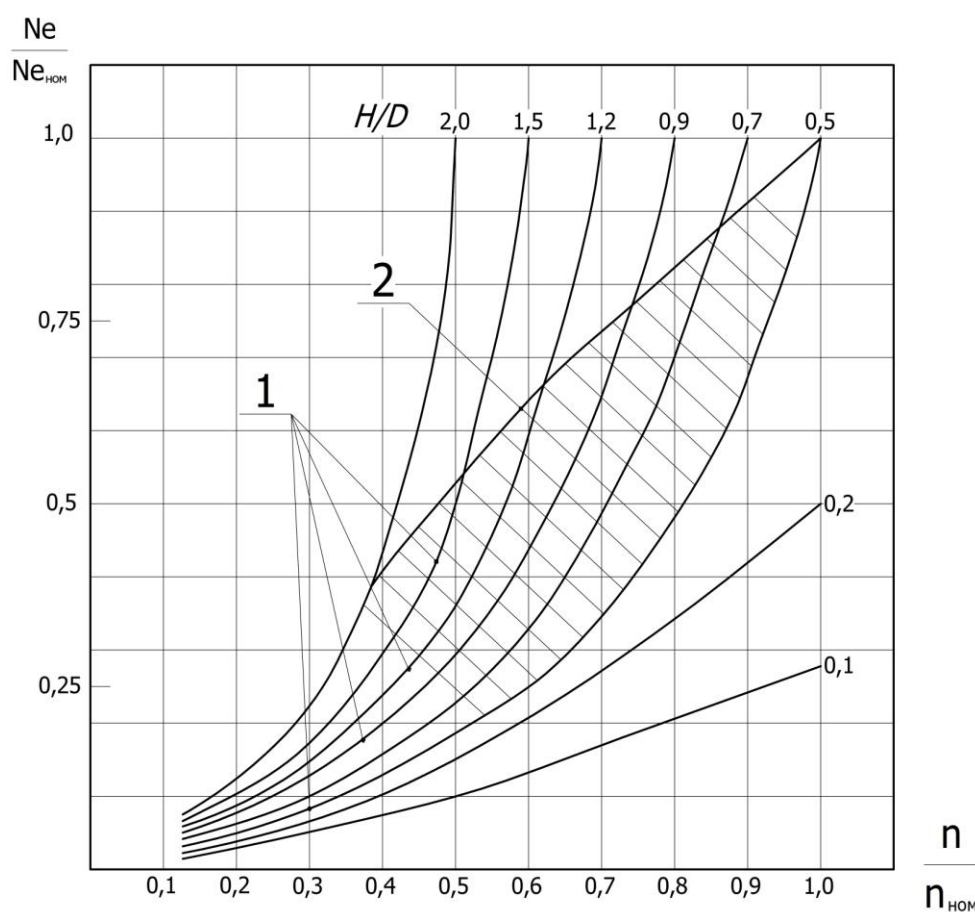


Рис.1. Зона возможных потребляемых мощностей:

1 – винтовые характеристики; 2 – внешняя характеристика номинальной мощности

Изображенные на рис. 1 винтовые характеристики для ВРШ можно построить, используя следующие зависимости [3]:

$$N_{ei} = N_{enom} \cdot \left(\frac{n_i}{n_{ном}} \right)^m \cdot \left\{ \alpha + (1 - \alpha) \cdot \left[\frac{(H/D)_i}{(H/D)_{ном}} \right]^l \right\},$$

$$M_{kpi} = M_{enom} \cdot \left(\frac{n_i}{n_{ном}} \right)^{m-1} \cdot \left\{ \alpha + (1 - \alpha) \cdot \left[\frac{(H/D)_i}{(H/D)_{ном}} \right]^l \right\},$$

где N_{ei} , M_{kpi} – текущие значения мощности и крутящего момента при определенных конкретных значениях n_i и H/D ; α – отношение мощности, потребляемой винтом при нулевом шаге к номинальной мощности; N_{enom} – номинальная мощность.

Для приближенных расчетов $\alpha \approx 0,25$; $m \approx 3$; $l \approx 2$. Эти значения уточняются на ходовых испытаниях. На рис. 1 показана серия винтовых характеристик для различных H/D . Винтовая характеристика при $H/D = 0,5$ фактически является номинальной характеристикой для ВФШ,

Винт регулируемого шага позволяет подобрать такое шаговое отношение для данной частоты вращения, при котором удельный расход топлива будет минимальным, кпд винта – максимальным, что невозможно достигнуть при работе с ВФШ,

3. ВЫБОР ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ГД С ВРШ

Выбор области эксплуатационных режимов производится в зависимости от типа двигателя и завода-изготовителя.

Заводы и фирмы производители двигателей руководствуются несколько отличающимися подходами к оценке допустимых уровней перегрузки и выбору конфигурации области эксплуатационных режимов ГД.

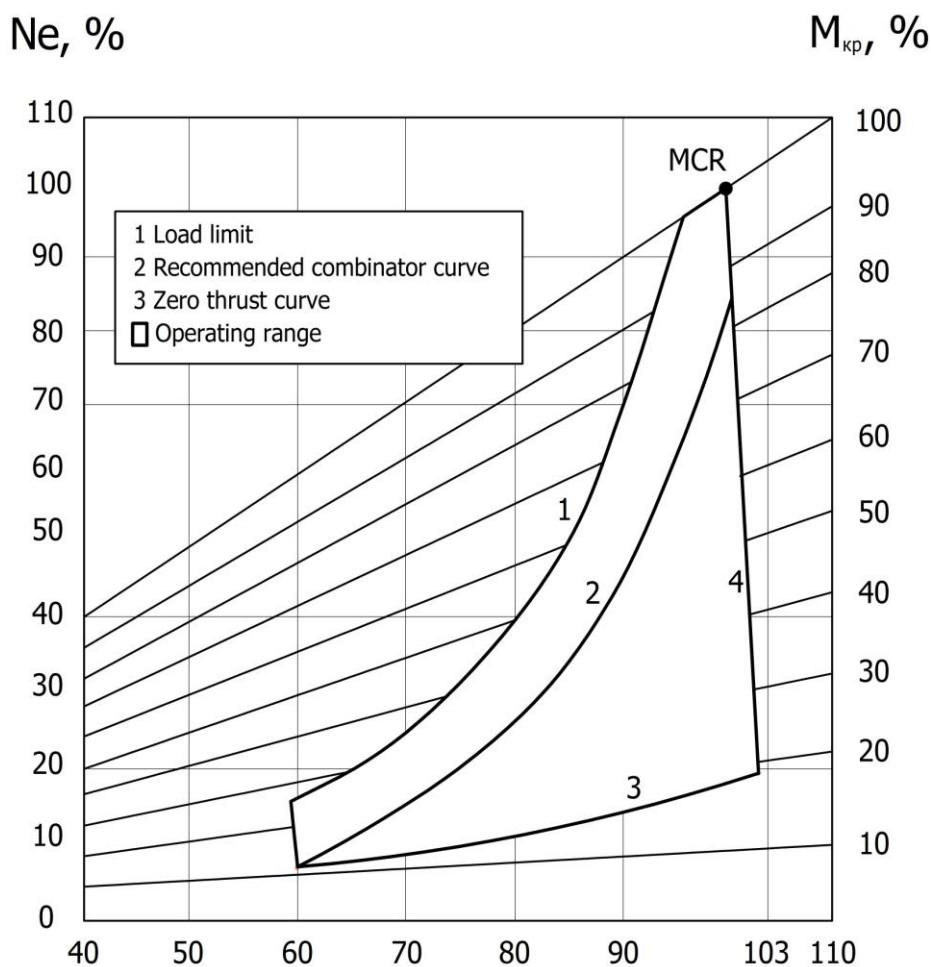


Рис. 2. Область рекомендованных режимов эксплуатации двигателя MAN L32/40 при работе с ВРШ:

1 – ограничительная характеристика; 2 – комбинаторная характеристика;
3 – винтовая характеристика нулевого упора; 4 – регуляторная характеристика

Она может полностью совпадать с номинальной винтовой (двигатель Wärtsilä L32, рис. 3) или частично совпадать, имея более сложную конфигурацию в зоне пониженных частот вращения двигателя (Wärtsilä 26, рис. 4). Эксплуатационные зоны допустимых режимов этих двигателей изображены на рис. 3, 4.

Даже двигатели одной фирмы-производителя, работающие на ВРШ, из-за различий в конструктивном исполнении характеризуются различными зонами эксплуатационных режимов [5].

Области рекомендованных и перегрузочных эксплуатационных режимов для двигателей фирмы Wärtsilä изображены на рис. 3, 4, 5.

Ограничительные характеристики у двигателей VASA 32D этой же фирмы выше теоретической (номинальной) винтовой характеристики (рисунок 5) также как у двигателя MAN L 32/40 (рисунок 2).

Ограничение по механическим напряжениям чаще учитывается только на перегрузочных режимах (рис. 3, 4).

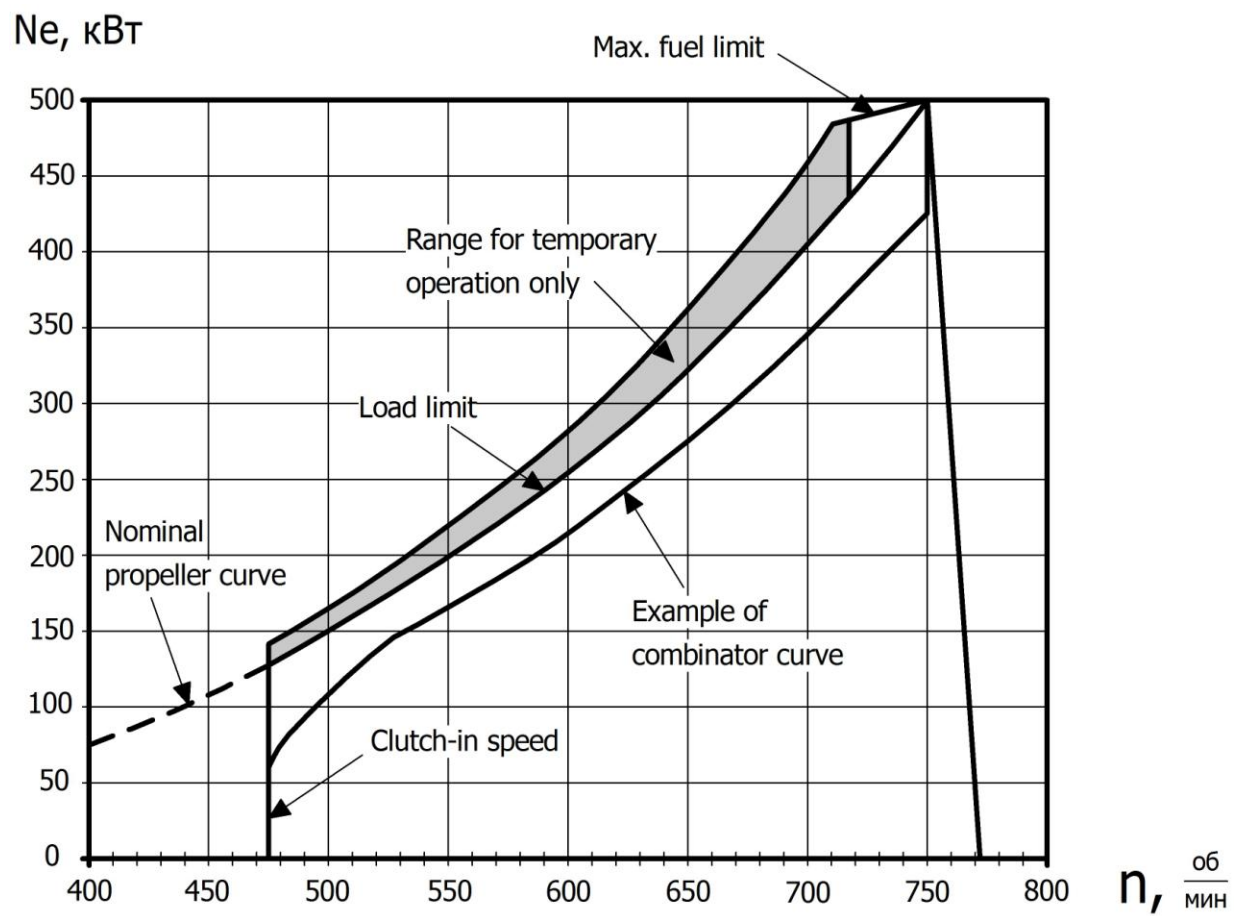


Рис. 3. Эксплуатационные режимы для двигателей Wärtsilä серии L32, работающих на ВРШ

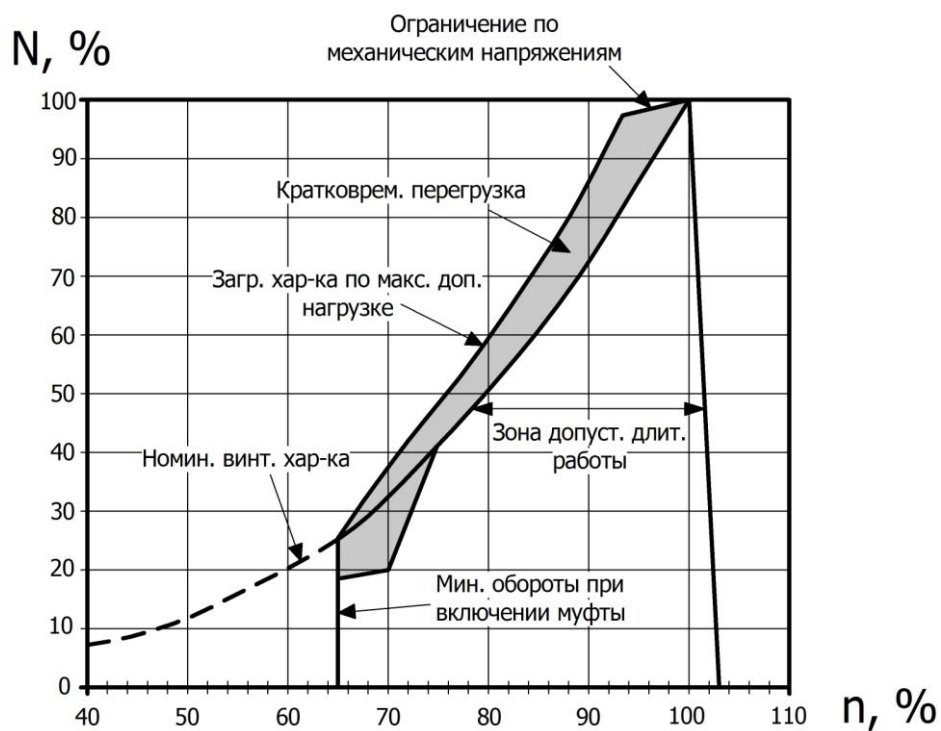


Рис. 4. Эксплуатационные режимы для двигателей Wärtsilä 26

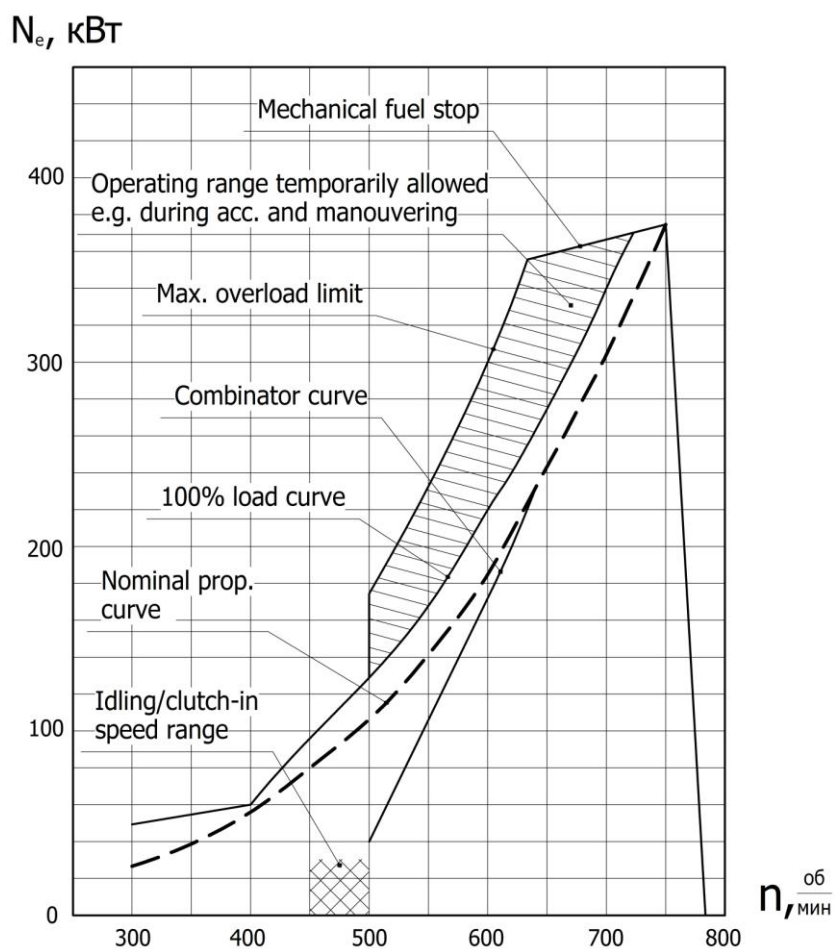


Рис. 5. Зоны режимов работы двигателя Wärtsilä Vasa 32D при наличии ВРШ

Ограничительная характеристика для работающих на ВРШ двигателей МАК (рис. 5) совпадает с верхней границей возможных комбинаторных кривых почти во всем диапазоне частот вращения и только в верхней части частот ($\bar{n} \geq 0,95$) совпадает с линией постоянного номинального крутящего момента (или иначе $p_e^{ном} = const$) [4, 7].

Указанное расположение ограничительной характеристики позволяет при полном использовании мощности на данной частоте обеспечить меньшие удельные расходы топлива, так как линия минимальных удельных расходов топлива более крутая и располагается правее и ниже номинальной винтовой характеристики.

Согласно [8] комбинаторная характеристика имеет несколько иной вид (без прямого участка в диапазоне частот $(0,975 \dots 1,0) n_{ном}$).

Область рекомендованных режимов для двигателей МАК, работающих на ВРШ, представлена на рис. 6. Она располагается между кривой 3, определяющей собой границу для комбинаторных кривых, представляющих собой геометрическое место точек оптимальных режимов двигателя с ВРШ, линией регуляторной характеристики 4 и кривой нулевого шага 5. Кривая 1 представляет собой расчетную (номинальную) винтовую характеристику для ВФШ. Кривая 2 – ограничительная характеристика по допускаемым кратковременным нагрузкам при маневрировании и сложных условиях плавания.

Номинальная винтовая характеристика располагается выше кратковременной ограничительной и в зоне скоростных режимов – ниже 95 % от номинального, двигатель при этом попадает в область перегрузок.

Этим объясняется настоятельная рекомендация фирмы МАК в импульсивных установках использовать винты регулируемого шага, позволяющие путем подбора шаговых отношений избегать перегрузок.

Таким образом, создается резерв по мощности двигателя [4]. Это объясняется тем, что современные высокоскоростные суда (контейнеровозы, многоцелевые и т.п.) имеют значительно более крутую номинальную винтовую характеристику ($m = 3,5 \dots 4,5$) и незначительное «утяжеление» винта приведет к значительной перегрузке двигателя, если не предусмотреть мер защиты.

В штормовую погоду можно будет поддерживать обороты винта и следовательно скорость судна на прежнем или близком к нему уровне, и избежав перегрузки ГД быстрее выйти из зоны шторма. С этой же целью современный СДУ с ВФШ часто снабжаются гребными винтами облегченного типа.

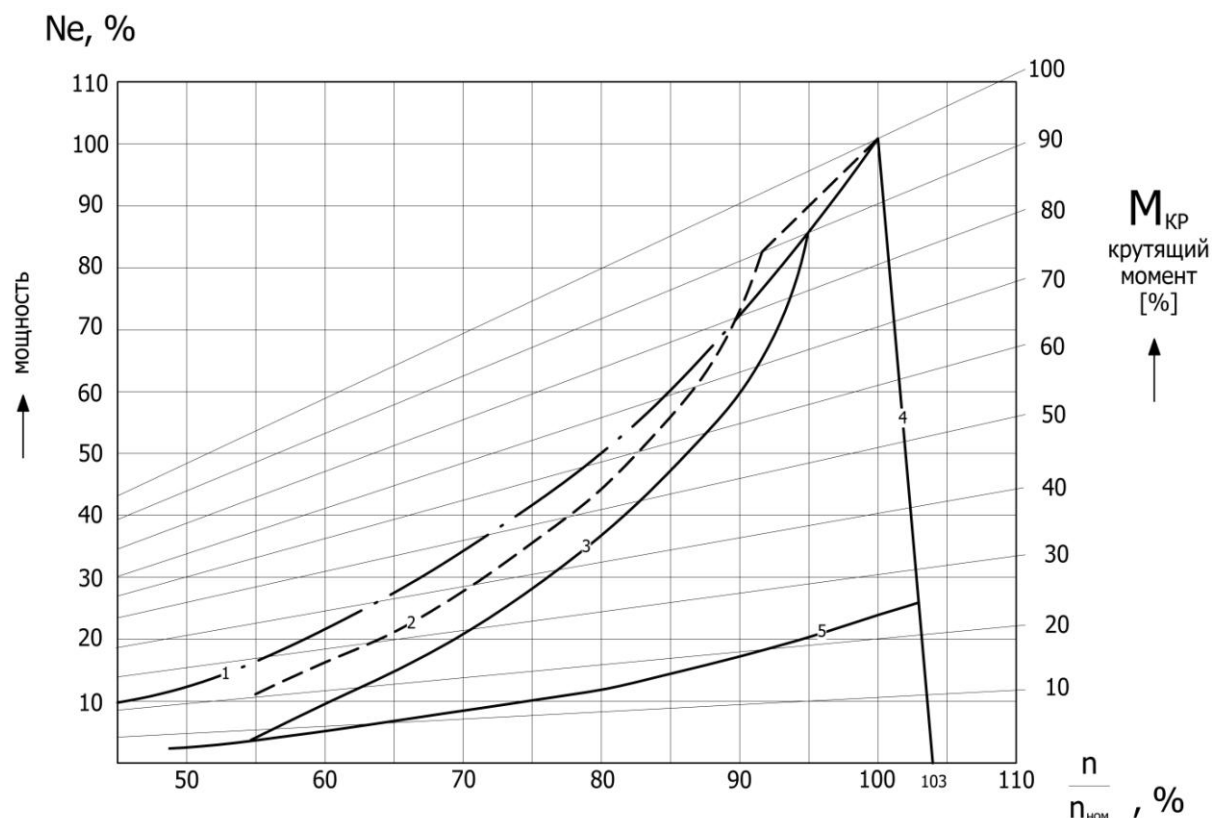


Рис. 6. Область рекомендованных режимов для двигателей МАК, работающих на ВРШ:
 1 – винтовая номинальная характеристика; 2 – ограничительная характеристика по кратковременным допускаемым нагрузкам; 3 – комбинаторная характеристика; 4 – регуляторная ограничительная характеристика; 5 – характеристика нулевого шага

4. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПЕРЕГРУЗОК ГД, РАБОТАЮЩИХ С ВРШ

В процессе маневрирования судна за счет значительных переключений руля и инерции судна возможна перегрузка ГД. Для предотвращения перегрузок предусматривается применение автоматического электронного регулятора нагрузки (АЭРН), предотвращающего перегрузку дизеля. АЭРН через четырехходовой трехпозиционный соленоидный клапан управляет работой корректирующего сервомотора, который корректирует положение лопастей ВРШ. Электронный регулятор нагрузки получает электрические сигналы от датчиков частоты вращения гребного вала и от датчика положения рейки ТНВД. Действуя совместно с регулятором скорости, обеспечивающим заданную частоту вращения, регулятор нагрузки при рассогласовании действительных и программных значений вырабатывает сигнал на разворот лопастей, так чтобы сохранить соответствующее заданному значению частоты вращения винта положение топливной рейки.

Схема подключения АЭРН приведена на рис. 7.

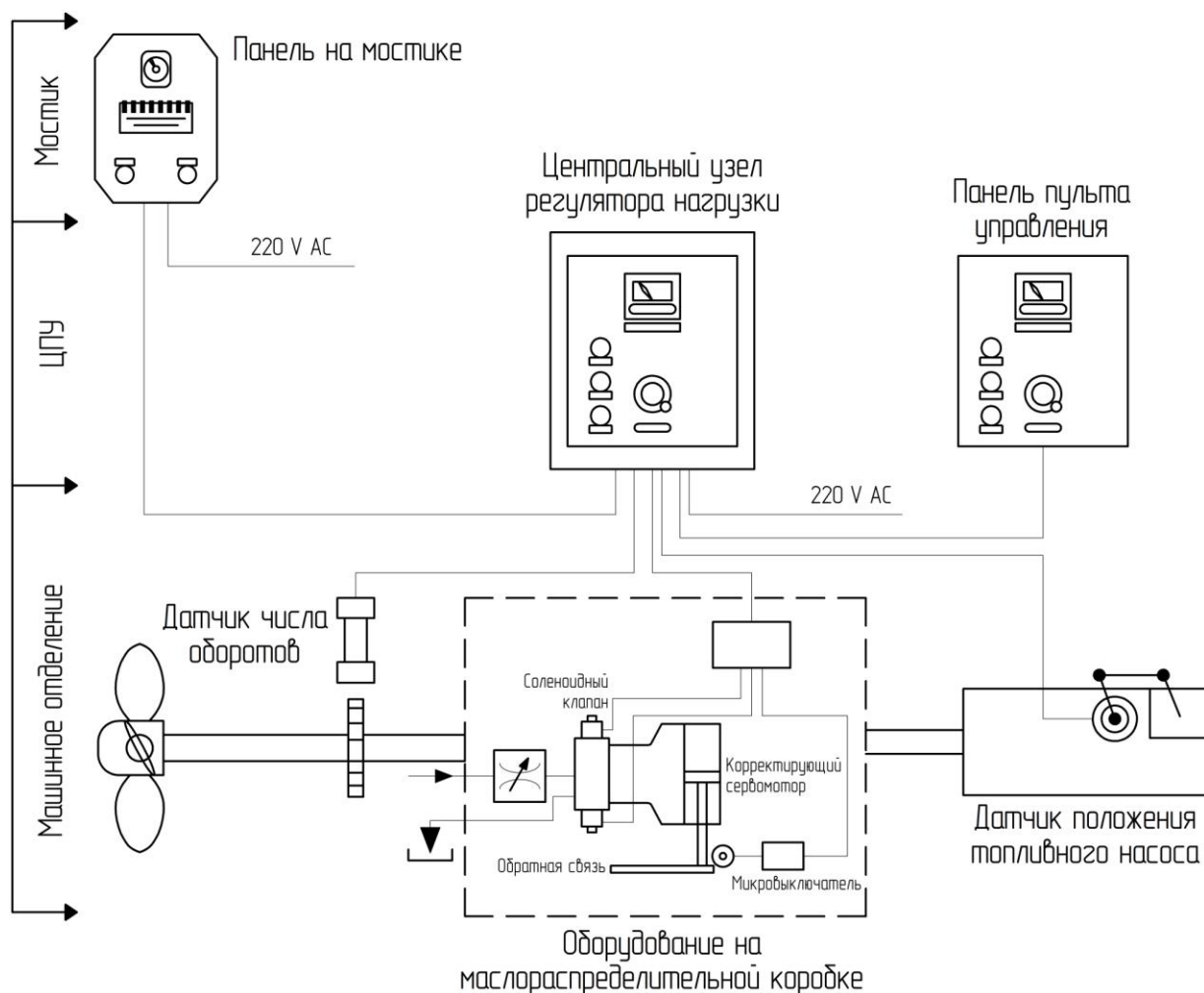


Рис. 7. Схема подключения АЭРН

При изменении условий плавания при любых внешних возмущениях момент и мощность ГД будут стабильны за счет изменения шага винта регулятором нагрузки.

Задание программ регулятора осуществляется из ЦПУ с учетом технического состояния ГД и специфичными условиями плавания. На рис. 8 приведены различные зависимости подачи топлива. Указанные зависимости можно корректировать с помощью настроечных потенциометров АЭРН.

Электронный регулятор нагрузки защищает двигатель от перегрузки при быстрых запусках, при остановке с полного хода, движении во льдах, остановке двигателя многодвигательной установки, выходе из строя топливных насосов или клапанов.

Быстро обеспечивает оптимальную нагрузку остальных двигателей при остановке одного двигателя или разъединении муфты.

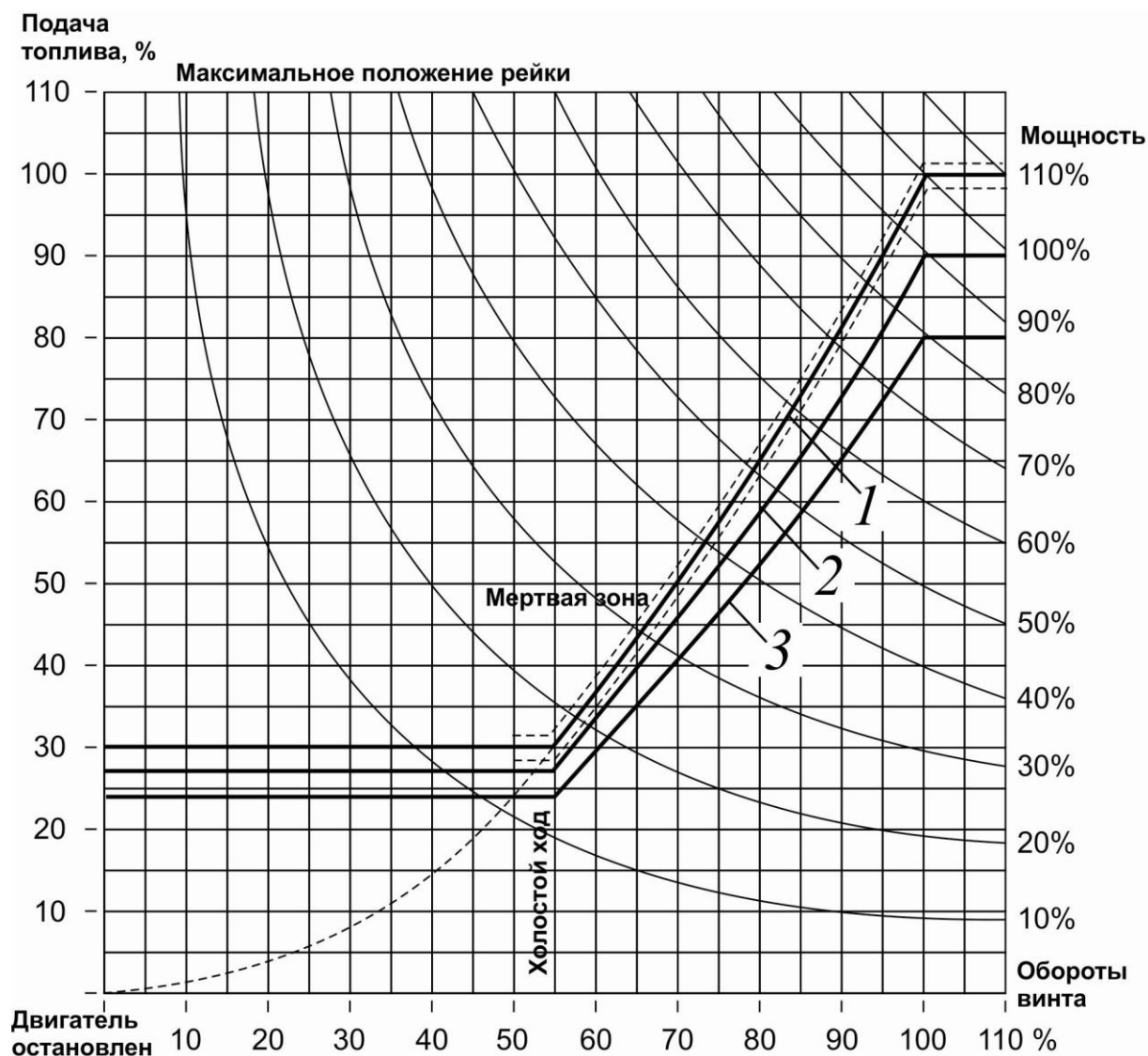


Рис. 8. Ограничительные зависимости подачи топлива от частоты вращения гребного вала:
 1 – 100 % нагрузка; 2 – 90 % нагрузка; 3 – 80 % нагрузка

Большое значение для правильного функционирования регулятора нагрузки имеет выбор оптимальной кривой нагрузки. Из опыта известно, что кривая нагрузки, которая совпадает или отличается незначительно от кривой винтовой характеристики, дает оптимальный результат при тех динамических процессах, которые происходят при ускорении и внезапных остановках с полного хода. Кривая нагрузки, предоставляется изготовителем двигателей. Эта кривая обеспечивает максимальный КПД двигателя и гребного винта.

Кривую нагрузки программируют, аппроксимируют некоторым числом прямых линий с очень незначительным отклонением от непрерывной

кривой. Ориентируясь на эти координаты, с помощью настроечных потенциометров, программируют кривую нагрузки в соответствующем модуле.

Выбор характера оптимальных программ и настройка производятся в зависимости от назначения судна и условий работы.

Регулятор нагрузки обладает консерватизмом, имея, как правило, зону чувствительности в пределах $\pm 1,5...2,0$ % и настраивается на достаточно длительное плавное возмущение, продолжительностью более 5 секунд. Это необходимо, чтобы избежать частых изменений положений лопастей винта.

При выходе из работы отдельных цилиндров (самоотключение из-за отказа ТНВД, форсунок) осуществляется автоматическая защита от перегрузки дизеля. При отключении цилиндра происходит соответствующее падение момента и мощности, следовательно, снизятся обороты гребного вала. Регулятор нагрузки уменьшит разворот лопастей. Произойдет переход на более легкую винтовую характеристику, обороты опять возрастут. Заброса по подаче топлива при отключении цилиндра не произойдет.

В зоне малых относительных оборотов винта (в установках с СОД) в диапазоне относительных оборотов $n = 0 - 55$ % подача топлива неизменна.

Ограничение нагрузки регулируется соответствующей ручкой на блоке управления. Расположенный там же указатель нагрузки показывает относительное положение рейки ТНВД.

Во время маневров при необходимости ограничение может быть снято. Тогда на пульте вручную необходимо осуществить переключение режима управления из положения «автомат» в положение «ручной», при этом АЭРН не действует, а управление осуществляется кнопками «больше» и «меньше». Воздействие на ВРШ осуществляется через трехпозиционный соленоидный клапан.

В подсистеме управления частотой вращения соответствующий пневмозадатчик воздействует на телемотор приемник частоты вращения, связанный с всережимным регулятором частоты вращения ГД.

Регулятор обеспечивает работу по заданным наклонным регуляторным характеристикам.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАНЯТИЯ

1. Рассчитать винтовые характеристики по формулам, приведенным в разделе 2 и построить в координатах N_e (%) – n (%) соответствующие зависимости для ЭУ с ВРШ одного из судов (желательно судовой ЭУ, рассматриваемой в ВКР).

2. Руководствуясь рекомендациями, приведенными в разделе 3 и технической документации, построить ограничительные характеристики по максимальной и минимальной частотам вращения.

3. В зависимости от рассматриваемого двигателя и фирмы-изготовителя посчитать или назначить ограничительные характеристики по длительной и кратковременной мощности. При этом нужно помнить, что характеристика представляет собой ломаную линию. Продолжительность линии ограничения по механическим напряжениям ($M_{кр} = 100 \%$) выбирается по техдокументации на рассматриваемый двигатель или двигатель той же фирмы близкий по типоразмеру, используя информацию, изложенную в разделе 3 методических указаний.

Обоснованная ограничительная характеристика по теплонапряженности (воздухоснабжению) определяется только на основании опыта завода-строителя в процессе доводочных работ и сдаточных испытаний и при непосредственной технической эксплуатации дизеля. При построении ограничительной характеристики по теплонапряженности следует использовать ограничительные характеристики, содержащиеся в инструкциях заводо-строителей.

Для проведения приблизительной оценки значений ограничительной характеристики по теплонапряженности можно воспользоваться простой зависимостью, приведенной в [9]:

$$N_T = \frac{N_e^{ном}}{3} \left[4 \left(\frac{n}{n_{ном}} \right)^k - 1 \right],$$

где k – переменный показатель. В зоне значений $\bar{n} = 0,2 \dots 0,5$ значение $k \approx 1,0$. В зоне значений $\bar{n} = 0,5 \dots 0,97$ диапазон изменения $k = 1,1 \dots 1,3$.

6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

1. Отчет выполняется на листах формата А4.
2. Отчет должен содержать название и цель занятия.
3. Отчет должен содержать расчетные винтовые характеристики $H/D = var$.
4. Отчет должен содержать диаграмму области эксплуатационных режимов ГД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выбор области эксплуатационных режимов ГД судовых дизельных установок с винтом регулируемого шага: учеб.-метод. пособие / Г.В. Гоголев, В.А. Тимофеев. – Севастополь, СевГУ, 2016.
2. Мясников Ю.Н. Информационные технологии в пропульсивном комплексе морского судна: монография / Ю.Н. Мясников, А.А. Иванченко, А.М. Никитин. – СПб: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2013. – 364 с.
3. Румб В.К. Судовые энергетические установки. Судовые дизельные энергетические установки: учебник СПбМТУ / В.К. Румб и др. – СПб, 2007. – 622 с.
4. Возницкий И.В. Современные судовые среднеоборотные двигатели: учеб. Пособие / И.В. Возницкий. – СПб, 2006. – 140 с.
5. Возницкий И.В. Вяртсиля. Среднеоборотные двигатели модельного ряда L20-L/V32. Конструкция, эксплуатация и техническое обслуживание / И.В. Возницкий. – М.: МОРКНИГА, 2008. – 128 с.
6. Гоголев Г.В. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок: учеб пособие / Г.В. Гоголев, Ю.А. Лисняк. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – 336 с.
7. Возницкий И.В. Судовые двигатели внутреннего сгорания / Том II, 2-е изд., перераб. и дополн., М.: МОРКНИГА, 2010. - 382 с.
8. МАК M32C. Project Guide/ Propulsion/ CATERPILLAR Motoren, GmbH/& CaKG, Kiel, 2007. – 99 с.
9. Гоголев Г.В., Тимофеев В.А. Выбор области эксплуатационных режимов главных двигателей в судовых дизельных установках с винтом фиксированного шага: учебно-метод. указания к практическому занятию / Г.В.Гоголев, В.А. Тимофеев. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 16 с.

**ВЫБОР ОБЛАСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ
ГЛАВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ
УСТАНОВКАХ С ВИНТОМ РЕГУЛИРУЕМОГО ШАГА**

*Методические указания
к практическому занятию*

Составители: **Гоголев** Геннадий Вениаминович,
Тимофеев Вячеслав Алексеевич

В авторской редакции

Изд. № 95/2019. Объем 1,25 п.л. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,23.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»