

ВАЛОГЕНЕРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ПРОМЫСЛОВОГО СУДНА С АСИНХРОНИЗИРОВАННОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНОЙ

Д-р техн. наук В.С. Богомолов, канд. техн. наук С.А. Павликов – КГТУ

Экономия дизельного топлива на судах флота рыбной промышленности – это одна из важнейших задач, являющаяся частью комплексной программы по экономии топливно-энергетических ресурсов.

Необходимая скорость (тяга) судна может быть достигнута при определенном соотношении частоты вращения гребного винта n и шага винта регулируемого шага (ВРШ) H/D . Использование обоих факторов управления при изменении величин n и H/D позволяет также достичь оптимального по расходу топлива режима работы машинодвижительного комплекса (МДК) судна. При этом синхронный валогенератор (ВГ) и его система автоматического управления (САУ) должны обеспечивать требуемые параметры качества электроэнергии, в том числе и постоянство частоты тока ВГ.

Многочисленные испытания, проведенные на 16 промысловых судах РТМ-С типа "Прометей" на промысле в ходовом и траловом режимах, показали, что расход дизельного топлива главного двигателя (ГД) при снижении частоты вращения гребного вала на 8–10 % (что соответствует частоте тока ВГ 47–46 Гц) уменьшается на 20–22 %, а расход смазочного масла сокращается на 12–14 %. Реальная годовая экономия дизельного топлива при использовании оптимального режима МДК на судах РТМ-С в Калининградской рыбопромышленной компании "Тралфлот" и Литовском госпредприятии рыболовного флота "Юра" составила 270–300 т на одно судно. При этом производительность механизмов тралового комплекса, получающих электропитание от ВГ, изменилась в практически допустимых пределах [1, 2, 3].

Осуществление оптимального по расходу топлива режима работы МДК судов РТМ-С без использования преоб-

разователя частоты ВГ стало возможным за счет наличия резервов характеристик электрических машин. Так, характеристика холостого хода ВГ имеет резерв по напряжению 33 %, что позволяет при $n=var$ изменять величину тока возбуждения ВГ для стабилизации его напряжения на требуемом уровне. Ограничением по уменьшению величины частоты вращения гребного вала является возрастание токов нагрузки потребителей электроэнергии ВГ, величина которых не должна превышать номинальные значения с некоторым запасом по току. Обеспечение требуемых параметров качества управления напряжением ВГ при $n=var$ было осуществлено за счет применения астатического интегрально-пропорционального (ИП) регулятора напряжения [1].

Увеличение диапазона изменения частоты вращения гребного вала и тем самым дальнейшее снижение расхода дизельного топлива ГД можно достичь путем применения асинхронизированного синхронного валогенератора (АС-ВГ). Существенным отличием АС-ВГ от синхронного валогенератора (С-ВГ) является то, что на его роторе может располагаться несколько обмоток, минимальное количество которых равно двум. Сдвиг между фазами обмоток ротора составляет половину полюсного деления. При наличии на роторе двух обмоток угол между ними составляет 90°. Обмотки распределены по поверхности ротора. В остальной конструкции АС-ВГ приближается к конструкции асинхронного генератора.

Обозначим угловую частоту вращения поля возбуждения относительно статора в номинальном режиме ω_0 , а угловую частоту вращения ротора ω_p . Очевидно, что ротор вращается относительно поля статора с частотой скольжения $\omega_c = \omega_p - \omega_0$, поскольку частоты

вращения поля и статора одинаковы. Тогда скольжение ротора будет $s_0 = \omega_c / \omega_0$.

Для установившегося режима угловая частота изменения напряжения обмоток возбуждения будет: $\omega_c = s_0 \omega_0$. Частота вращения ротора АС-ВГ может отличаться от синхронной, причем для поддержания синхронной частоты вращения поля возбуждения частота изменения напряжения обмоток возбуждения должна быть равной ω_c . Таким образом, чем меньше частота вращения ротора, тем больше ω_c . Это является одним из ограничений пределов изменения частоты вращения ротора АС-ВГ.

Электромагнитный момент АС-ВГ определяется следующим образом:

$$M_0 = s_0 \omega_0 \mu TV^2 / x(1 + s_0^2 \omega_0^2 \delta^2 T^2) - 1/x A_0 V, \quad (1)$$

где μ – коэффициент магнитной связи обмоток АС-ВГ; T – постоянная времени обмоток возбуждения; V – напряжение на шинах системы; x – синхронное реактивное сопротивление генератора и линии; δ – коэффициент магнитного рассеяния; A_0 – коэффициент, задающий закон регулирования напряжения возбуждения.

Первая составляющая выражения (1) представляет собой асинхронный момент, обусловленный вращением ротора относительно магнитного поля машины. Вторая составляющая не зависит от скольжения и может быть названа синхронным моментом. Наличие асинхронного момента приводит к необходимости исследовать устойчивость АС-ВГ по частоте вращения. Зависимость асинхронного момента от скольжения показана на рис. 1, а.

При значениях скольжения, больших критического скольжения $s_{кр}$, АС-ВГ работает неустойчиво по частоте вращения. Для повышения устойчивости АС-ВГ уменьшение асинхронного момента необходимо компенсировать за счет изменения синхронного момента. При от-

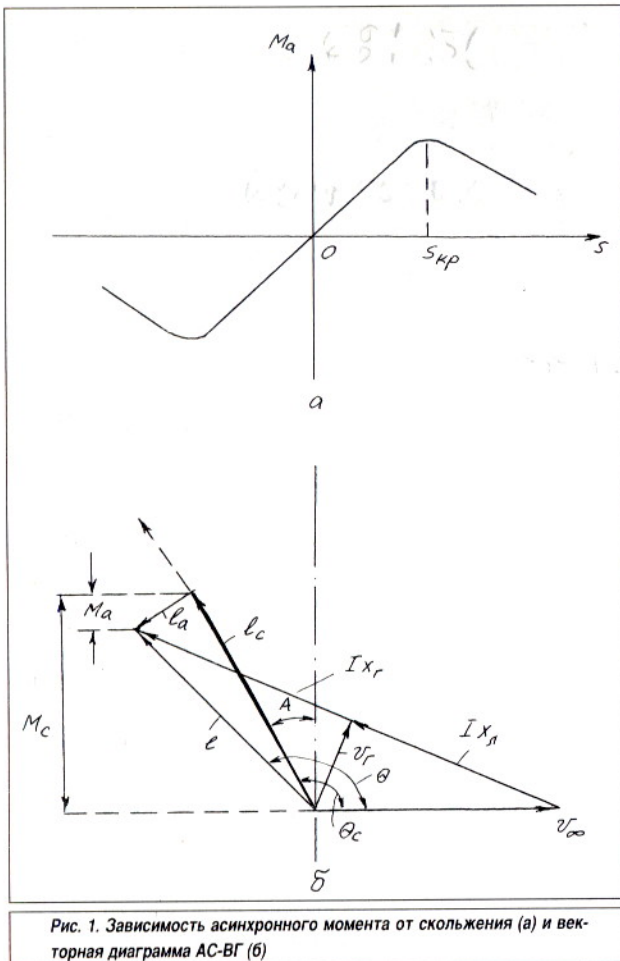


Рис. 1. Зависимость асинхронного момента от скольжения (а) и векторная диаграмма АС-ВГ (б)

рицательных значениях скольжения, превышающих s_{kp} , с ростом абсолютной величины скольжения значение M_a увеличивается, так как синхронный и асинхронный моменты имеют разные знаки (рис. 1, б), а абсолютное значение момента M_a уменьшается (см. рис. 1, а). Увеличение значения M_a приводит к дальнейшему росту скольжения. Для предотвращения увеличения скольжения необходимо уменьшить синхронный момент.

Внешняя характеристика $V = f(I_n)$ отражает способность АС-ВГ обеспечивать требуемое качество электроэнергии при изменении нагрузки в широком диапазоне. На векторной диаграмме АС-ВГ (см. рис. 1, б) ЭДС обмотки статора представлена в виде двух составляющих: синхронной I_s и асинхронной I_a . Угол θ между вектором I и напряжением V характеризует величину момента M_a , который пропорционален проекции вектора I на ось ординат. Максимальное значение момента соответствует углу $\theta = \pi/2$. Значение угла θ , близкое к $\pi/2$, поддерживается САУ возбуждением АС-ВГ. Для изменения величины напряжения генератора V_r требуется изменить угол θ_c , а

следовательно, и угол θ , что осуществляется САУ возбуждением. Для этого в закон регулирования возбуждения необходимо ввести дополнительно угол $A = \theta_c - \pi/2$. Это вызывает увеличение M_a и замедление движения роста АС-ВГ. В результате асинхронная составляющая ЭДС увеличится, что приведет к увеличению напряжения генератора и восстановлению прежнего значения M_a . Изменяя угол A , можно получить любую зависимость напряжения АС-ВГ от нагрузки, т.е. статическую или астатическую внешнюю характеристику.

М.М.Ботвинником предложен вариант закона регулирования с полной компенсацией запаздывания в цепи ротора [4]. Суть его заключается во введении в закон регулирования напряжения возбуждения дополнительных членов, зависящих от производных тока статора:

$$\begin{aligned} E_d &= (1+T_p)(\alpha_0 + \alpha_1 s + \alpha_2 ps) \sin(\delta + A) + \mu T x p i_{d1} \\ E_q &= (1+T_p)(\alpha_0 + \alpha_1 s + \alpha_2 ps) \cos(\delta + A) + \mu T x p i_{q1} \end{aligned} \quad (2)$$

где E_d , E_q – напряжения, подведенные к обмоткам возбуждения, совпадающие с направлением осей d и q ; α_0 , α_1 , α_2 – коэффициенты, обеспечивающие необходимую настройку регулятора возбуждения; δ – угол между поперечной осью q , вращающейся, как и ось d , вместе с ротором и вектором напряжения фазы A статора.

Правильный выбор коэффициентов d_1 и d_2 обеспечивает устойчивость работы АС-ВГ по частоте вращения. Входными параметрами системы возбуждения являются скольжение, угол δ , ток статора; выходными величинами – напряжение E_d и E_q , подводимые к обмоткам возбуждения. При выбранном законе регулирования возбуждения переход

от одной частоты вращения к другой происходит по экспоненте, причем время перехода можно изменять с помощью регулирования величины коэффициентов α_1 и α_2 .

Диапазон асинхронизации машины определяется величинами мощности и предельного напряжения системы возбуждения. Для обеспечения оптимального режима работы МДК судна частота вращения ГД может изменяться относительно средней величины ω_0 в диапазоне $\pm 8\%$, а предельное скольжение, на которое должен быть рассчитан АС-ВГ, составляет 0,08. При этом мощность и напряжение обмотки возбуждения машины будут минимальными.

Установлено, что АС-ВГ обладает более жесткими внешними характеристиками по сравнению с С-ВГ, обеспечивает более высокую статистическую и динамическую устойчивость параллельной работы, позволяет безынерционно регулировать частоту напряжения судовой сети [5, 6]. Вместе с тем указано на ограниченное применение АС-ВГ в связи с тем, что асинхронизированная синхронная машина не является широко распространенным видом электрических машин.

Как отмечалось выше, АС-ВГ обеспечивает возможность оптимизации режима работы МДК по расходу топлива. При этом система управления АС-ВГ, как и для С-ВГ, состоит из двух контуров, в первом регулируются напряжение и его частота в соответствии с законом регулирования (2), во втором – частота вращения ГД и шаг ВРШ по закону, обеспечивающему минимум расхода дизельного топлива. Оба регулятора связаны только через гребной вал в переходном процессе изменения его частоты вращения. Такая система управления может быть отнесена к системам подчиненного управления (СПУ) со связью регуляторов через объект управления [1]. Входные сигналы каждого из контуров регулирования – это разностный сигнал между заданным и действительным значениями регулируемого в данном контуре параметра. Контур регулирования напряжения и его частоты – внутренний, подчиненный сигналу от внешнего контура регулирования частоты вращения гребного вала, а значит, и АС-ВГ.

Таким образом, регулятор частоты вращения гребного вала и шага ВРШ осуществляет изменение этих параметров в соответствии с алгоритмом опти-

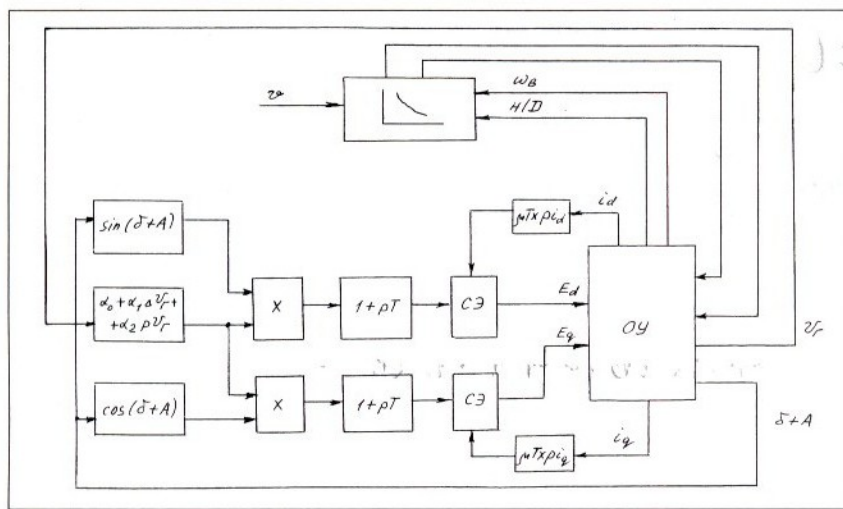


Рис. 2. Структурная схема системы подчиненного управления АС-ВГ

мального регулирования по минимуму расхода топлива независимо от напряжения АС-ВГ. Регулятор напряжения и его частоты стабилизирует эти параметры на заданном уровне в условиях изменяющейся частоты вращения АС-ВГ.

Структурная схема системы подчиненного управления АС-ВГ показана на рис. 2. Объект управления (ОУ) – это источник следующих сигналов: i_d , i_q – продольная и поперечная составляющие тока статора АС-ВГ; V_r – напряжение на обмотке статора; $\delta + A$ – осевой угол; n – частота вращения вала; H/D – отношение шага винта.

Входным сигналом блока, формирующего закон регулирования n и H/D , является скорость судна v . Этот блок воздействует на изменение данных параметров ОУ, контролируя их фактические значения. Входными сигналами регулятора напряжения и частоты АС-ВГ, реализующего закон регулирования (2), являются величины i_d , i_q , V_r , $\delta + A$. В результате формируются напряжения E_d и E_q на роторе такой амплитуды и частоты, что величина напряжения обмотки статора АС-ВГ и его частота находятся в заданных пределах.

Реализацию системы подчиненного управления АС-ВГ со связью регуляторов напряжения и частоты вращения через объект регулирования можно осуществить с помощью астатических регуляторов напряжения и частоты вращения. Для реализации астатического регулятора напряжения необходимо в обратную связь регулятора включить корректирующее звено интегрально-пропорционального (ИП) типа, выполненное на дискретных R , C -элементах [1]. Реализацию СПУ можно также провести и на базе

микропроцессорных средств (МПС), одновременно осуществляя при этом и оптимальный закон изменения частоты вращения и угла разворота ВРШ при изменении скорости хода судна.

Параметры обмоток статора АС-ВГ и С-ВГ отличаются незначительно, существенные различия имеются в параметрах систем возбуждения этих генераторов, оценить величину которых можно косвенным путем. На основании анализа величины мощности на валу машины и на обмотках статора при переходе к именованным единицам имеет место следующая закономерность: $P_v = sP_{нг}$, где P_v – мощность системы возбуждения, соответствующая скольжению s ; $P_{нг}$ – номинальная мощность АС-ВГ.

Если параметры АС-ВГ выбраны благоприятным образом, то его скольжение будет изменяться в диапазоне $\pm 0,08$, при неблагоприятном варианте – в диапазоне $\pm 0,16$, что потребует увеличения вдвое мощности системы возбуждения.

На промысловых судах СТМ типа «Орленок», перспективных для дальнейшего использования, установлен ВГ мощностью 610 кВт. При благоприятном варианте выбора параметров АС-ВГ мощность его системы возбуждения будет: $P_v = 0,08 \times 610 = 48,8$ кВт, что превышает мощность системы возбуждения С-ВГ. Имея в виду, что потери в обмотках ротора АС-ВГ равнозначны этим же потерям в С-ВГ [4], а ток обмотки возбуждения С-ВГ на судах СТМ равен 38 А, получим, что напряжение АС-ВГ должно составлять 200 В.

Использование асинхронизированных синхронных валогенераторов в оптимальном по расходу топлива режиме работы МДК, что ранее не применялось

на промысловых судах, позволит получить существенную экономию топлива ГД и повысить качество эксплуатации флота рыбной промышленности страны.

Выводы:

1) для обеспечения оптимального по расходу топлива режима работы МДК промысловых судов независимо от имеющихся резервов характеристик электрических машин выгодно использование в качестве валогенератора асинхронизированных синхронных машин, имеющих две обмотки на роторе и позволяющих стабилизировать не только напряжение, но и его частоту на выходе валогенератора при изменении частоты вращения гребного вала;

2) регулирование параметров АС-ВГ целесообразно осуществлять с помощью системы подчиненного управления напряжения и его частоты, а реализацию ее проводить на базе использования микропроцессорных средств, одновременно обеспечивая и оптимальное соотношение величин частоты вращения вала и угла разворота ВРШ;

3) на основании расчетов эффект использования оптимального режима машинодвигательного комплекса может быть увеличен с достижением экономии топлива в 1,5–1,7 раза больше, чем при использовании С-ВГ;

4) применение АС-ВГ желательно на новостроящихся судах, а также на действующих судах после их коренной модернизации.

Литература

1. Богомолов В.С. Повышение эффективности эксплуатации валогенераторов рыбопромысловых судов. – Калининград: Кн. изд-во, 1989. – 144 с.
2. Богомолов В.С., Титов В.В., Циулин В.А. Оптимизация работы машинодвигательного комплекса рыбопромысловых судов // Рыбное хозяйство. 1989. № 11. С. 61–62.
3. Богомолов В.С., Титов В.В., Циулин В.А. Оптимизация работы судовой пропульсивной установки рыбопромысловых судов // Судостроение. 1992. № 4. С. 15–16.
4. Ботвинник М.М. Асинхронизированная синхронная машина. Основы теории. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 67 с.
5. Драпкин А.Е., Китаенко Г.И., Лазаревский Н.А. Асинхронизированный синхронный валогенератор. // Труды ЦНИИ СЭТ. – Л.: Судостроение. 1974. Вып. 10.
6. Драпкин А.Е., Лазаревский Н.А., Гандин Б.Д. Управление режимами синхронизации валогенераторов на промысловых судах // Судостроение. 1975. № 7.