

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.316.722; 621.316.726

А. Е. Егоров,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ СУДОВЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

MATHEMATICAL MODELS OF ELECTRONIC VOLTAGE AND FREQUENCY REGULATORS OF SHIPS GENERATORS

В статье приведены особенности современных электронных регуляторов напряжения и частоты судовых дизель-генераторных агрегатов. Предложены математические модели таких регуляторов. Данные модели могут использоваться при моделировании судовых электроэнергетических систем в различных режимах работы.

The features of modern electronic regulators of voltage and frequency, which are used in ships diesel-generator units, are presented in the article. The mathematical models of such regulators are offered. The given models can be used at modeling of ships electrical systems in various operating modes.

Ключевые слова: математическая модель, электронный регулятор напряжения, электронный регулятор частоты вращения, дизель-генераторный агрегат.

Key words: mathematical model, electronic voltage regulator, electronic speed governor, diesel-generator unit.



ЛЯ обеспечения постоянства напряжения и частоты электрической энергии в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) с дизель-генераторными агрегатами (ДГА) используются автоматические регуляторы напряжения (АРН) и частоты вращения (АРЧВ) приводного дизельного двигателя.

В настоящее время на судах старой постройки находят применение регуляторы напряжения статического типа прямого компаундирования с коррекцией напряжения, а также центробежные механические и гидромеханические регуляторы частоты вращения приводного дизеля, которые зарекомендовали себя как надежно работающие регулирующие устройства. Их математические модели широко представлены в отечественной научной литературе [1]. Однако функциональные возможности таких регуляторов ограничены, в связи с этим совершенствование современных систем автоматического регулирования (САР) и систем автоматического управления (САУ) судовых электростанций (СЭС) идет по пути использования электронных регуляторов на микропроцессорной основе. С применением электронных регуляторов в САР и САУ СЭС обеспечивается новый, качественно более высокий уровень, позволяющий реализовать более сложные алгоритмы управления СЭС и обеспечить недостижимые ранее показатели качества электрической энергии в судовой сети. Необходимым условием для улучшения качества процесса регулирования является оптимизация как структуры регулятора, так и его параметров. Структура и параметры регуляторов напряжения и частоты определяют характер процессов в СЭЭС в различных режимах работы. Для исследования процессов в СЭЭС с помощью компьютерного моделирования необходимы модели автоматических регуляторов напряжения и частоты, учитывающие их основные особенности. Таким образом, актуальной научной задачей является разработка математических моделей электронных регуляторов напряжения и частоты судовых генераторных агрегатов.

Для составления математических моделей прежде всего необходимо исследовать сам объект моделирования. ДГА с электронными автоматическими регуляторами напряжения и частоты используются в качестве источников электрической энергии в современных единых высоковольтных судовых электроэнергетических системах (ЕВСЭЭС) с комплексами Azipod. Структурная схема такого генераторного агрегата приведена на рис. 1.

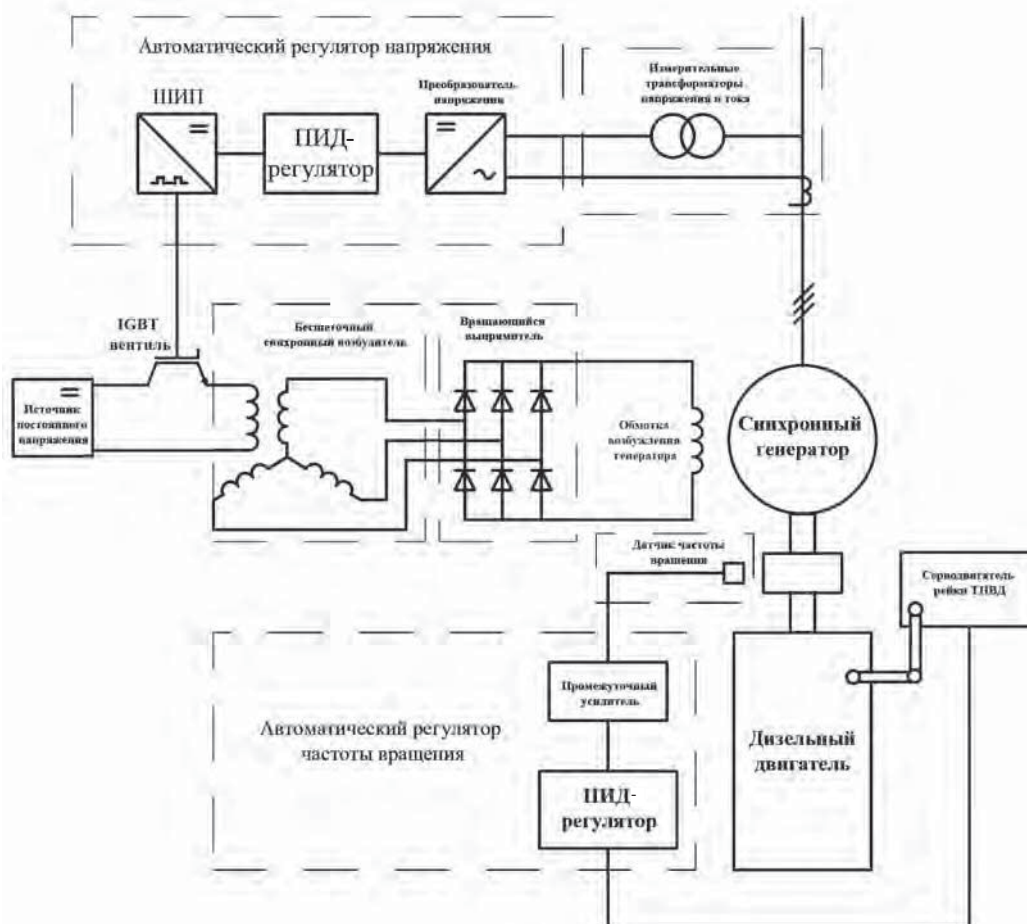


Рис. 1. Структурная схема дизель-генераторного агрегата современной ЕВСЭЭС

Для регулирования напряжения возбуждения таких генераторов используется электронный импульсный регулятор постоянного тока, который преобразует постоянное напряжение источника питания в регулируемое напряжение обмотки возбуждения синхронного возбудителя. В таких преобразователях используются силовые полупроводниковые управляемые ключи IGBT-транзисторы, а регулирование напряжения в них происходит за счет широтно-импульсной модуляции напряжения источника питания.

Управляющие сигналы на полупроводниковый вентиль поступают от электронного автоматического регулятора напряжения (АРН), который состоит из преобразователя в цифровые сигналы измеряемых параметров генератора, поступающих с измерительных трансформаторов напряжения и тока; цифрового ПИД-регулятора и широтно-импульсного преобразователя (ШИП), формирующего сигналы управления силового ключа IGBT (рис. 1).

Основой электронного автоматического регулятора частоты вращения (АРЧВ) приводного дизельного двигателя также является ПИД-регулятор. Заметим, что автоматические регуляторы частоты и напряжения являются основными элементами систем автоматического распределения активной и реактивной нагрузок параллельно работающих синхронных генераторов (СГ).

Разрабатывая математическую модель электронного автоматического регулятора напряжения на основе электронного ПИД-регулятора и силового полупроводникового IGBT-вентилля, необходимо учесть их характерные особенности.

Назначение ПИД-регулятора заключается в поддержании заданного значения $u_{\text{зад}}$ некоторой входной величины путем ее сравнения с выходным текущим значением $u_{\text{вых}}$, которое осуществляется с помощью сигнала отрицательной обратной связи $u_{\text{о.с.}}$. Разность этих двух величин $e = (u_{\text{зад}} - u_{\text{о.с.}})$ называется рассогласованием или отклонением от заданной величины.

В дальнейшем будем рассматривать обобщенный ПИД-регулятор с реальным дифференцирующим звеном. Передаточная функция этого регулятора определяется выражением

$$W_p(p) = K_{PR} + \frac{K_{IR}}{p} + \frac{pK_{DR}}{1 + T_{DR}p}, \quad (1)$$

где K_{PR} , K_{IR} , K_{DR} — коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора соответственно; T_{DR} — постоянная времени дифференцирования.

Структурная модель с передаточными функциями звеньев, иллюстрирующая принцип работы ПИД-регулятора, представлена на рис. 2.

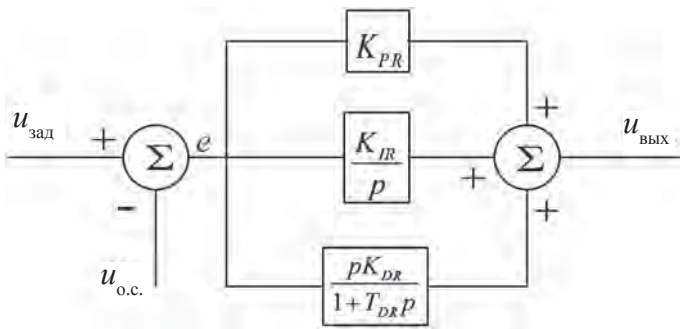


Рис. 2. Структурная модель ПИД-регулятора

Основная передаточная функция, описывающая силовой полупроводниковый IGBT-вентиль электронного регулятора, который выполняет функцию усилителя сигнала ПИД-регулятора, имеет вид

$$W_p(p) = \frac{K_A}{1 + T_A p}, \quad (2)$$

где K_A — коэффициент усиления напряжения; T_A — постоянная времени.

Для нормальной работы регулятора должны быть указаны предельные значения выходного напряжения $u_{R\max}$ и

$u_{R\min}$ для предупреждения ситуаций перевозбуждения и недовозбуждения генератора. Блок ограничения — это стабилизирующий элемент, логические условия работы которого могут быть описаны следующим образом:

$$u_{R\min} \leq u_i \leq u_{R\max}, \quad (3)$$

при $u_i > u_{R\max}$, тогда $u_i = u_{R\max}$;

при $u_i < u_{R\min}$, тогда $u_i = u_{R\min}$.

Также модель АРН необходимо дополнить элементом, описывающим измерительный преобразователь переменного напряжения генератора в сигналы постоянного тока, адаптированные для ПИД-регулятора.

Преобразователь напряжения преобразует сигналы с измерительных трансформаторов в цифровые, его передаточную функцию можно также выразить через апериодическое звено первого порядка:

$$W_R(p) = \frac{K_R}{1 + T_R p}, \quad (4)$$

где K_R — коэффициент пропорциональности (усиления) преобразователя; T_R — постоянная времени преобразователя; p — оператор дифференцирования.

Структурная модель электронного автоматического регулятора напряжения, созданная на основе математических моделей его основных элементов, представлена на рис. 3.

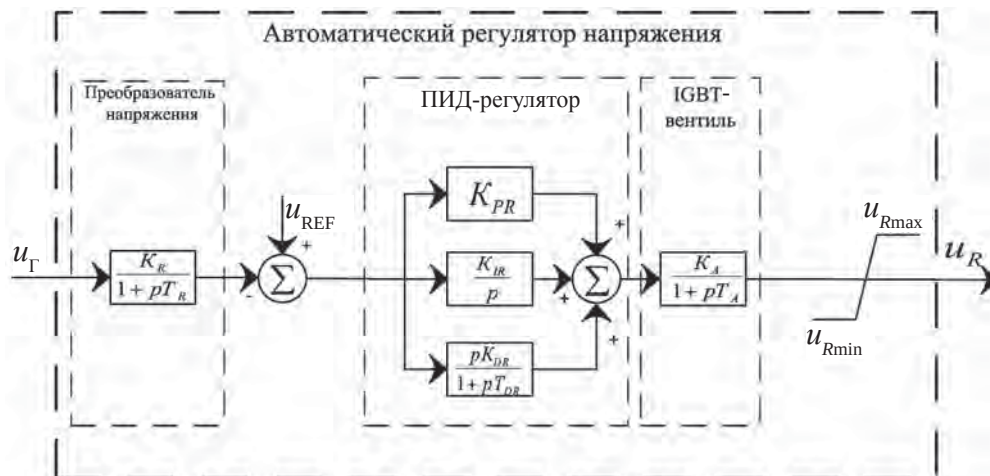


Рис. 3. Структурная модель электронного АРН

В данной модели: u_G — текущее напряжение генератора; u_{REF} — напряжение уставки; u_R — выходной сигнал с регулятора, подаваемый в систему возбуждения самого генератора.

Учитывая, что выходное напряжение с регулятора равно напряжению возбуждения бесщеточного возбудителя $u_R = u_{f1}$, математическая модель электронного АРН БСГ примет вид

$$\left. \begin{aligned} u_{f1} &= \frac{K_A}{1 + pT_A} \left(K_{PR} + \frac{K_{IR}}{p} + \frac{pK_{DR}}{1 + pT_{DR}} \right) \left(\frac{K_R}{1 + pT_R} \sqrt{u_d^2 + u_q^2} - u_{REF} \right); \\ u_{Rmin} &\leq u_{f1} \leq u_{Rmax}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В математической модели приводного дизельного двигателя с электронным автоматическим регулятором частоты вращения регулировочным параметром дизеля как объекта системы автоматического регулирования является частота вращения его вала. К валу двигателя приложены с одной стороны вращающий момент двигателя, а с другой — электромагнитный момент СГ и момент инерции.

Регулирующее воздействие двигателя создается регулирующим органом, изменяющим количество топлива, от которого непосредственно зависит вращающий момент первичного двигателя. Для дизельного двигателя регулирующим органом является рейка топливных насосов высокого давления (ТНВД).

Выбор структуры АРЧВ и закона регулирования определяется несколькими факторами. В современных СЭС приводные дизельные двигатели синхронных генераторов оснащены цифровыми ПИД-регуляторами частоты вращения. При разработке структурной модели такого регулятора удобно воспользоваться моделью, представленной на рис. 2. В дополнение к этому необходимо также добавить блок, описывающий сервомеханизм рейки ТНВД, в качестве которого могут использоваться исполнительные электродвигатели, а также электрогидравлические агрегаты. В этом случае наиболее удобно описать данный элемент с помощью аperiodического звена первого порядка:

$$W_M(p) = \frac{K_M}{1 + pT_M}, \quad (6)$$

где T_M — электромеханическая постоянная времени серводвигателя; K_M — коэффициент усиления серводвигателя.

Сам же дизельный двигатель вносит некоторое запаздывание с момента изменения положения рейки ТНВД до соответствующего изменения частоты вращения его вала, связано это со временем на протекание химических процессов внутри камеры сгорания, а также с инерцией механических узлов. Поэтому предпочтительнее представить дизельный двигатель как звено чистого запаздывания с передаточной функцией, имеющий вид

$$W_D(p) = e^{-pT_D}, \quad (7)$$

где T_D — постоянная времени дизеля.

На рис. 4 представлена структурная модель электронного ПИД-регулятора частоты вращения в сочетании с серводвигателем рейки ТНВД и моделью дизельного двигателя.

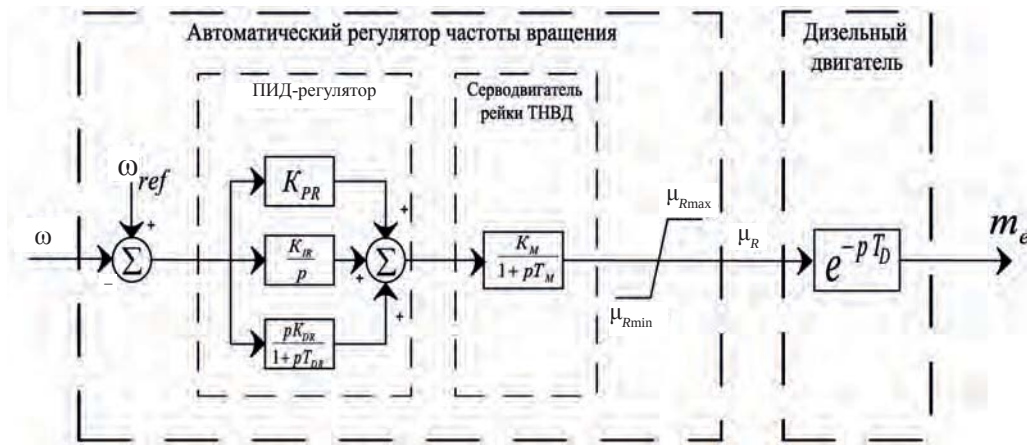


Рис. 4. Структурная модель дизельного двигателя с регулятором частоты вращения:

ω — текущая частота вращения дизеля; ω_{ref} — частота вращения уставки;
 μ_R — относительное положение рейки ТНВД; m_e — момент на валу дизеля

Учитывая, что относительная разность частот есть скольжение генератора, математическая модель электронного автоматического регулятора частоты вращения будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \mu_R &= \frac{K_M}{p(1+pT_M)} \left(K_{PR} + \frac{K_{IR}}{p} + \frac{pK_{DR}}{1+pT_{DR}} \right) (\omega_{ref} - \omega); \\ m_e &= \mu_R e^{-pT_D}; \\ \mu_{Rmin} &\leq \mu_R \leq \mu_{Rmax}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Выводы. В данной статье автором разработаны и предложены математические модели электронных регуляторов напряжения и частоты генераторных агрегатов, используемых в современных ЕВСЭЭС с комплексами Azipod перспективных судов. Предложенные модели совместно с моделью высоковольтного бесщеточного синхронного генератора могут использоваться в составе математической модели ЕВСЭЭС при компьютерном моделировании ее нормальных и аварийных режимов работы.

Список литературы

1. Баранов А. П. Моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации: учебник для вузов / А. П. Баранов, М. М. Раимов. — СПб.: ЭЛМОР, 1997. — 232 с.
2. Герман-Галкин С. Г. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. — СПб.: Корона-Век, 2008. — 367 с.
3. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies // IEEE Standard. — 2005. — Vol. 421, № 5 (Rev. of IEEE 521.5-1992).