

УДК 629.424.3: 621.314.12

## ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ЗУБЬЕВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ШЕСТЕРНИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ САР ЧАСТОТЫ МОЩНОЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

А.Б. Богаевский, профессор, д.т.н., ХНАДУ

*Аннотация.* Проведено исследование влияния запаздывания по измерению частоты на показатели устойчивости мощной дизель – генераторной установки с импульсным датчиком частоты в обратной связи. На основании критерия Найквиста определено минимально допустимое число зубьев в измерительной шестерне.

*Ключевые слова:* регулирование, частота, запаздывание, устойчивость, число зубьев, измерительная шестерня

## ВПЛИВ КІЛЬКОСТІ ЗУБЦІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ШЕСТЕРНІ НА СТІЙКІСТЬ САР ЧАСТОТИ ПОТУЖНОЇ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

О.Б. Богаєвський, професор, д.т.н., ХНАДУ

*Анотація.* Виконано дослідження впливу запізнення по виміру частоти обертання на показники стійкості потужної дизель – генераторної установки з імпульсним датчиком частоти в зворотному зв'язку. На підставі критерію Найквіста визначена мінімально допустима кількість зубців у вимірювальній шестерні

*Ключові слова :* регулювання, частота, запізнення, стійкість, кількість зубців, вимірювальна шестерня

## NUMBER OF TEETH EFFECT OF MEASURING GEAR ON STABILITY THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FREQUENCY POWERFUL DIESEL-GENERATOR SET

A.Bogaevskiy, Professor, Doctor of Technical Sciences, KhNAHU

*Annotation.* The effect of the delay on the measurement of frequency stability performance powerful diesel - generator set with a pulse frequency sensor feedback. On the basis of the Nyquist criterion to determine the minimum allowable number of teeth in the measuring gear.

*Keywords:* regulation, frequency, delay, stability, number of teeth, the measuring gear

### Введение и постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями

Рост затрат на тепловую и электрическую энергию у промышленных предприятий привел к появлению у последних автономных когенерационных установок на основе мощных стационарных дизель-генераторов. В

качестве основы когенерационной установки часто используют стационарные промышленные или вспомогательные корабельные дизель-генераторы, которые по своей мощности полностью обеспечивают потребности в тепле и электроэнергии небольшие компактно расположенные промышленные объекты. Часто дизель-генераторные установки переводят на газовое топливо. Газопоршневые

когенерационные установки (мини-ТЭЦ) в настоящих условиях зачастую являются оптимальным решением энергоснабжения небольших предприятий, особенно в холодный период года [1].

### **Анализ последних исследований и публикаций**

В случае если дизель-генератор был переведен на газовое топливо, то качество регулирования при этом существенно определяется рабочими процессами дизеля с газовым топливом, рациональными схемами питания двигателя газовым топливом и для чего, очевидно, понадобится создание соответствующих элементов этих систем [2].

Стоимость дизель-генераторной установки мощностью 1,0 МВт и выше начинается от миллиона гривен и возрастает по мере увеличения мощности. Срок их эксплуатации, как правило, составляет десятки лет. Такие дорогие энергетические установки постоянно совершенствуются. Одним из эффективных направлений совершенствования является замена старых гидромеханических регуляторов частоты вращения коленчатого вала на современные микроконтроллерные регуляторы, которые позволяют снижать эксплуатационный расход топлива [4,5], а также позволяют обеспечить жесткие требования по поддержанию частоты генерации автономной энергетической установки (50 Гц), которая в случае необходимости может работать параллельно с внешней сетью. Также необходимо учитывать особенности протекания рабочих процессов в двигателях [2]. Внедрение микроконтроллерных регуляторов предполагает применение датчиков частоты вращения импульсного типа, которые устанавливаются напротив зубьев вращающейся шестерни [3], которая должна максимально жестко соединяться с коленчатым валом двигателя. Такая установка датчика позволяет в процессе регулирования частоты не учитывать механические люфты, которые негативно сказываются на качестве самого процесса регулирования.

Использование в цепи измерения частоты импульсных датчиков, снимающих дискретно во времени информацию с зубьев вращающейся шестерни, приводит для систем регулирования частоты вращения дизель-генераторов к образованию звена запаздывания.

### **Цель работы**

Корректный выбор количества зубьев на измерительной шестерне представляет собой важную техническую задачу в процессе внедрения современных систем регулирования на энергетических установках. Особенно это важно для энергетических установок, созданных на базе корабельных стационарных дизель-генераторов, у которых на маховике (общепринятом месте расположения импульсных датчиков частоты для подобных систем) отсутствует зубчатый венец, так как запуск морских дизелей осуществляется сжатым воздухом, а не стартером, как в дизелях промышленного и железнодорожного применения. Подобную венцу конструкцию для уверенной работы датчиков необходимо создавать в процессе ремонта дизеля или при установке системы непосредственно на дизельном агрегате перед пусконаладочными работами. Процесс этот достаточно затратный во времени и требует высокой квалификации исполнителей. Поэтому путем уменьшения числа зубьев (отметок) для считывания информации о частоте можно снизить трудозатраты на этом ответственном этапе работы. Эта техническая задача также актуальна при внедрении современных электронных систем регулирования частоты на некоторых типах дизель-генераторов резервного (аварийного) электропитания энергоблоков атомных электростанций, у которых имеет место пуск дизеля сжатым воздухом.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование влияния числа зубьев  $z$  на устойчивость процесса регулирования частоты.

### **Основная часть исследования**

Наличие звеньев с запаздыванием часто встречается в различных технологических процессах. Но в случае использования измерения частоты с помощью импульсных датчиков для микроконтроллерных регуляторов частоты образование звена запаздывания - технологическая неизбежность. Характеристики этого звена запаздывания и степень его влияния на показатели процесса регулирования определяются частотой вращения коленчатого вала двигателя и количеством зубьев измерительной шестерни  $z$ . Очевидно, что при фиксированном числе зубьев измерительной шестерни  $z$  с уменьшением частоты

вращения величина времени запаздывания  $\tau_{\text{зап}}$  будет увеличиваться, а это приведет к ухудшению показателей регулирования. И соответственно увеличение частоты вращения приводит к уменьшению времени запаздывания и улучшению показателей.

Для достижения поставленных целей при выполнении настоящей работы использованы методы теории нелинейных импульсных систем автоматического управления и моделирование переходных процессов системы регулирования.

Передаточная функция звена с запаздыванием имеет вид

$$W_{\text{зап}}(p) = e^{-p\tau_{\text{зап}}} \quad (1)$$

Структурная схема одноконтурной САУ со звеном запаздывания в цепи измерения частоты вращения может быть представлена в виде, как показано на рис. 1

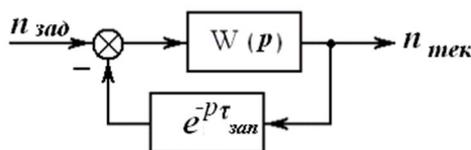


Рис.1 Структурная схема одноконтурной САУ со звеном чистого запаздывания

Как показал Цыпкин Я. З., для исследования устойчивости систем с запаздыванием удобно применять критерий устойчивости Найквиста [6]. Формулировка критерия устойчивости Найквиста для систем с чистым запаздыванием аналогична формулировке для систем без запаздывания, имеющих дробно-рациональные передаточные функции.

Выражение для АФЧХ разомкнутой системы в этом случае:

$$\begin{aligned} W(j\omega) \cdot e^{-j\omega\tau_{\text{зап}}} &= A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} \cdot e^{-j\omega\tau_{\text{зап}}} = \\ &= A(\omega) \cdot e^{j(\varphi(\omega) - \omega\tau_{\text{зап}})} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $A(\omega)$  – амплитудная составляющая АФЧХ;  
 $\varphi(\omega) - \omega\tau_{\text{зап}}$  – фазовая составляющая АФЧХ.

Из выражения (2) видно, что звено запазды-

вания не меняет модуль  $A(\omega)$  АФЧХ разомкнутой системы, а вносит дополнительный отрицательный фазовый сдвиг  $\omega\tau_{\text{зап}}$ , пропорциональный частоте  $\omega$  с коэффициентом пропорциональности, равным времени запаздывания  $\tau_{\text{зап}}$ .

Критические условия устойчивости для фаз имеют вид

$$\varphi(\omega_{\text{кр}}) - \omega_{\text{кр}} \tau_{\text{зап}} = -\pi, \quad (3)$$

т.е. общий угол сдвига не должен превышать величину  $-\pi$ .

Представим величины, входящие в выражения (2) и (3), через значения числа зубьев  $z$  и частоту вращения вала двигателя  $n_{\text{тек}}$  (см. рис.1), обычно измеряемую в оборотах за мин.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{тек}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{\text{тек}}}{60} \quad (4)$$

$$\tau_{\text{зап}} = \frac{T_{\text{тек}}}{z} = \frac{60}{n_{\text{тек}} \cdot z}, \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{зап}}(\omega) = \omega \cdot \tau_{\text{зап}} = \frac{2 \cdot \pi}{z} \quad (6)$$

Преобразования (4) – (6) показывают, что фазовый сдвиг, вносимый звеном запаздывания, зависит от числа зубьев  $z$ . Из (6) следует, что существует риск не обеспечить устойчивое управление при количестве зубьев 1 или 2 на шестерне, так как в этом случае звено запаздывания сразу же вносит сдвиг, равный согласно (3) критическому значению  $-\pi$  или больше.

Необходимо при этом отметить, что измерять частоту вращения можно по любому количеству зубьев в шестерне (начиная с 1-го), а для устойчивого управления замкнутой системой (рис.1) в шестерне должно быть не менее 3-х зубьев.

Для иллюстрации полученных утверждений было проведено моделирование процессов регулирования частоты в системе на созданной в среде Simulinc модели [7]. Моделировались случаи переходных процессов в замкнутой системе для различного количества зубьев в измерительной шестерне. Моделирование показало, что устойчивое управле-

ние может быть обеспечено и при числе зубьев равном 2. Однако при этом необходимо перестроить (изменить) исходную передаточную функцию системы  $W(p)$ . Результаты моделирования при  $z = 2$  рис. 2 и 3.

Подтвердился в процессе моделирования факт улучшения показателей регулирования как при увеличении частоты вращения, так и при увеличении числа зубьев в измерительной шестерне.

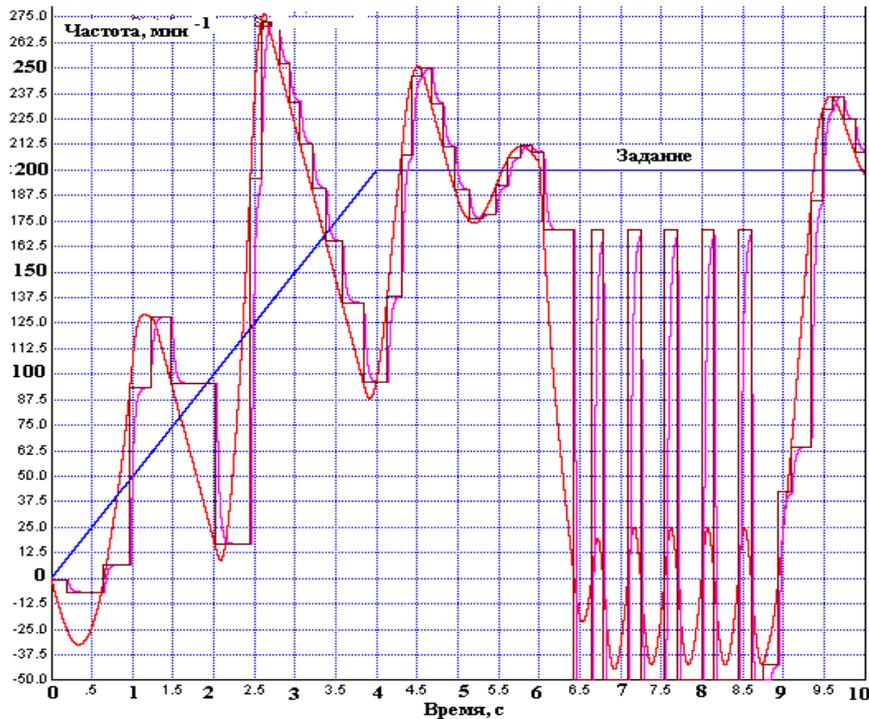


Рис.2. Процессы в системе с  $z = 2$  без перестройки параметров

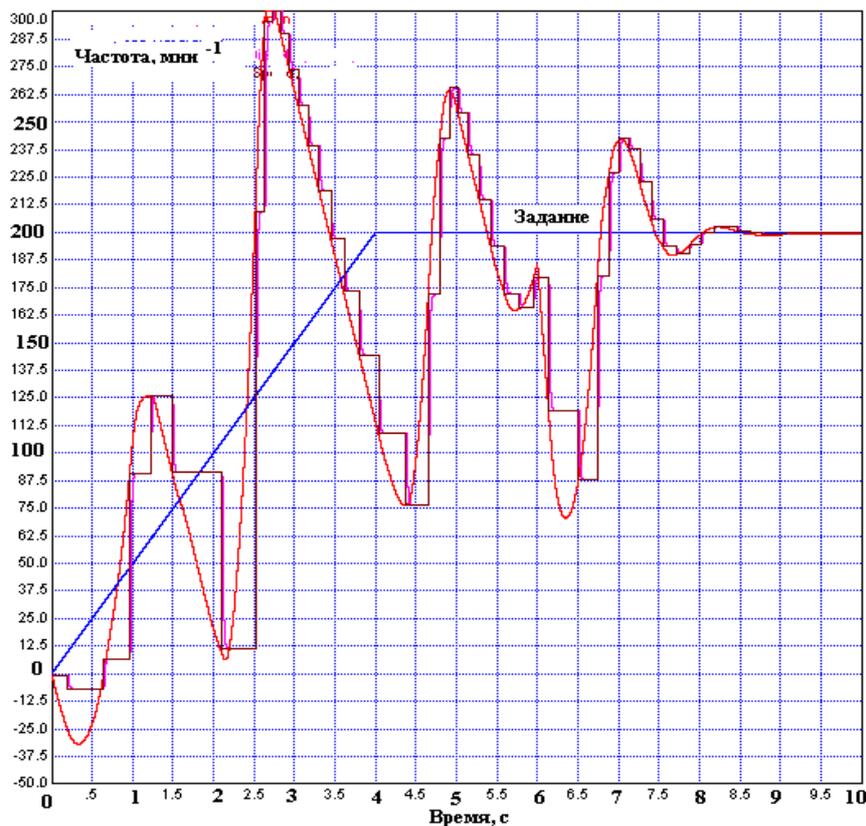


Рис.3. Процессы в системе с  $z = 2$  с перестройкой параметров

### Выводы

Полученные в исследованиях статьи выражения и результаты могут быть использованы при обосновании характеристик и алгоритмов функционирования микроконтроллерных систем управления в процессе их внедрения на стационарных дизель-генераторах.

### Литература

1. Гудков С.А., Лебедева Е.А. Когенерация, использование когенерационных установок. (Нижний Новгород, РФ, ННГАСУ)  
[www.rae.ru/forum2012/pdf/2930.pdf](http://www.rae.ru/forum2012/pdf/2930.pdf)
2. Абрамчук Ф.И., Левтеров А.М. Опыт конвертации дизелей в газовые двигатели с искровым зажиганием. Журнал «Автомобильный транспорт», вып. № 21/2007.  
<http://cyberleninka.ru/article/n/opyt-konvertatsii-dizeley-v-gazovye-dvigateli-s-iskrovym-zazhiganiem>
3. Щеглов А.А. Регулирование частоты вращения судового двигателя внутреннего сгорания. Вестник МГТУ, том 9, №2, 2006 г. стр.312-317 [http://www.vestnik.mstu.edu.ru/v09\\_2\\_n22/articles/21\\_shcheg.pdf](http://www.vestnik.mstu.edu.ru/v09_2_n22/articles/21_shcheg.pdf)
4. Косов Е.Е. Совершенствование режимов работы силовых энергетических систем тепловозов / Е.Е. Косов, Е.М. Шапран, В.В. Фурман // Издавна. СХУ ім. В.Даля. - Луганськ: СХУ, 2006. – 278 с.
5. Моделювання перехідних процесів тепловозного дизеля в експлуатаційному циклі з метою встановлення шляхів зниження витрат палива. // Н.-тех. звіт. № 0199U003102. – Харків, ХарДАЗТ, 2001. – 96 с.
6. Я.З. Цыпкин . Теория нелинейных импульсных систем / Цыпкин Я.З., Попков Ю.С. // Москва, Гл. ред. физ.-мат. литературы издательства «Наука», 1973. – 416 с.
7. А.Б. Богаевский. Компьютерная модель мощного транспортного дизель-генератора с электронной системой управления / Богаевский А.Б. // Открытые информационные и компьютерные интегральные технологии. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», вып. 38, 2008. – с. 150 – 169.

Рецензент: Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редколлегию 1.11.2015