

**А. Б. БОГАЕВСКИЙ, А. Н. БОРИСЕНКО, Б. И. КУБРИК, С. А. ЛИТВИНЕНКО, Е.А. БОРИСЕНКО**

## **ВЛИЯНИЕ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

**Аннотация.** Проведено исследование влияния запаздывания по измерению частоты на показатели устойчивости и точности регулирования мощной дизель-генераторной установки с импульсным датчиком частоты в обратной связи. Используются методы теории нелинейных импульсных систем автоматического управления и моделирование переходных процессов системы регулирования. На основании критерия Найквиста определено минимально допустимое число зубьев в измерительной шестерне. Получены практические выражения по определению числа зубьев для обеспечения требуемой точности регулирования.

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

**Введение и постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями. Анализ последних исследований и публикаций.** 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.

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 [1].

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 [3, 4], 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 [1].

Внедрение микроконтроллерных регуляторов

предполагает применение датчиков частоты вращения импульсного типа, которые устанавливаются напротив зубьев вращающейся шестерни [2], 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 приведет 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

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

Как показал Цыпкин Я. З., для исследования устойчивости систем с запаздыванием удобно применять критерий устойчивости Найквиста [5]. Формулировка критерия устойчивости Найквиста для систем с чистым запаздыванием аналогична формулировке для систем без запаздывания, имеющих дробно-рациональные передаточные функции.

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

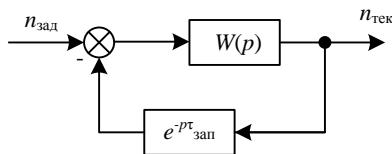


Рис.1 – Структурная схема одноконтурной САУ со звеном чистого запаздывания

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 запаздывания 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.

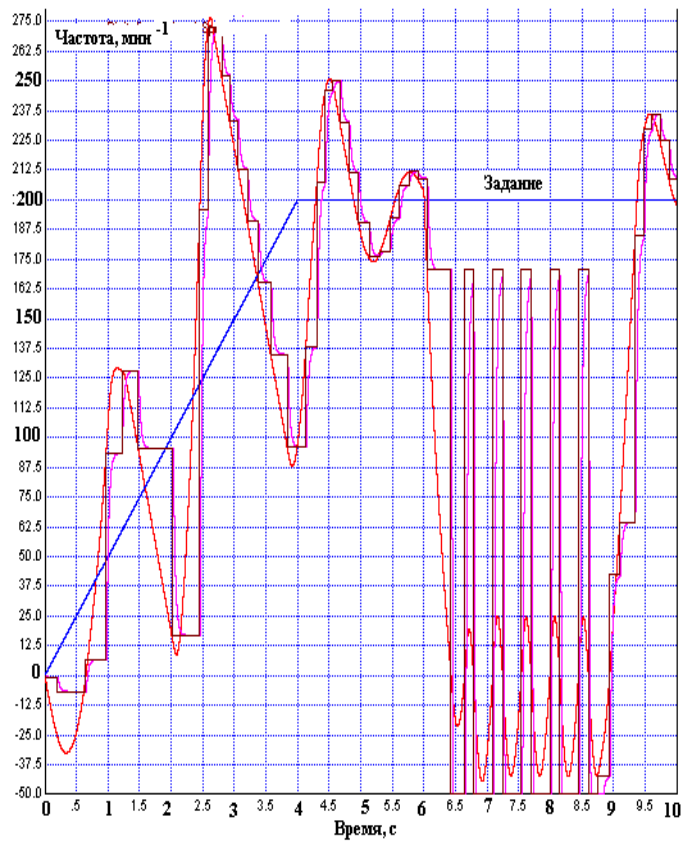
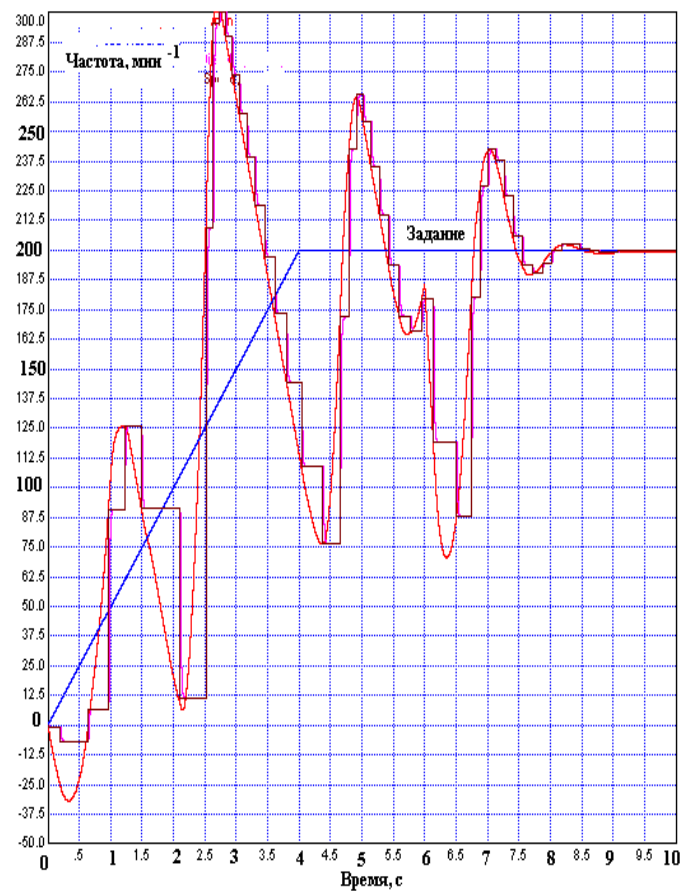
Необходимо при этом отметить, что измерять частоту вращения можно по любому количеству зубьев в шестерне (начиная с 1-го), а для устойчивого управления замкнутой системой (рис. 1) в шестерне должно быть не менее 3-х зубьев.

Для иллюстрации полученных утверждений было проведено моделирование процессов регулирования частоты в системе на созданной в среде Simulinc модели [6]. Моделировались случаи переходных процессов в замкнутой системе для различного количества зубьев в измерительной шестерне. Моделирование показало, что устойчивое управление 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.

Количество зубьев  $z$  в измерительной шестерне влияет также на частоту дискретизации по времени такого параметра как частота вращения вала дизель-генераторной установки, а, следовательно, от выбора числа зубьев зависит точность измерения текущего значения частоты  $n_{\text{тек}}$ . Частота следования импульсов с датчика определяется из выражения

$$f_{\text{датч}} = \frac{n_{\text{тек}} \cdot z}{60}. \quad (7)$$

Рис.2 – Процессы в системе с  $z = 2$  без перестройки параметровРис.3 – Процессы в системе с  $z = 2$  с перестройкой параметров

Если диапазон регулирования частоты широк (что характерно для транспортных дизель-генераторных установок), то выбирать количество

зубьев необходимо для минимальной частоты вращения  $n_{\min}$ . С увеличением частоты вращения вала частота следования импульсов с датчика возрастает и

погрешность измерения из-за дискретизации по времени снижается.

Согласно теореме А. В. Котельникова частота вращения вала дизель-генератора, на котором установлены импульсный датчик с шестерней, должна быть минимум в 2 раза ниже, чем по выражению (7). На практике же для того, чтобы обеспечить достаточную точность измерения с помощью шестерни с числом зубьев  $z$ , частота согласно выражению (7) должна быть еще меньше. Для дальнейшей оценки примем это значение следующим

$$f_{\text{валаДГ}} = \frac{n_{\text{тек}} \cdot z}{2 \cdot 60 \cdot 10} = \frac{n_{\text{мин}} \cdot z}{1200}, \quad (8)$$

где  $n_{\text{мин}}$  - минимальная частота вращения вала дизель-генератора,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$f_{\text{валаДГ}}$  - частота вала дизель-генератора, Гц.

Угловая частота вращения вала дизель-генератора  $\omega_{\text{валаДГ}}$  с учетом (8) определится из выражения

$$\omega_{\text{валаДГ}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{мин}} \cdot z}{1200} \approx \frac{n_{\text{мин}} \cdot z}{200}. \quad (9)$$

Полученное выражение (9) фактически для электромеханической системы представляет собой частоту полосы пропускания. В этом случае через выражение частоты полосы пропускания, согласно [7], можно представить выражение для времени  $t_{\text{пп}}$  переходного процесса исполнительного механизма системы регулирования в следующем виде

$$t_{\text{пп}} = \frac{4,5}{\omega_{\text{валаДГ}}} = \frac{900}{n_{\text{мин}} \cdot z}. \quad (10)$$

Для известных исполнительных механизмов (актуаторов) дизель-генераторных установок различного назначения время  $t_{\text{пп}}$  переходного процесса составляет величину в пределах от 0,05 до 0,2 с в зависимости от конструкции. Приняв значение  $t_{\text{пп}}$  равным, например, 0,1 с при реальной минимальной частоте вращения вала дизель-генераторной установки  $n_{\text{мин}} 200 \text{ мин}^{-1}$  из выражения (10) определим число зубьев  $z = 45$ , при котором обеспечится необходимая точность измерения текущей частоты вращения.

На рис. 4 приведены результаты моделирования переходных процессов в системе с количеством зубьев  $z=45$ .

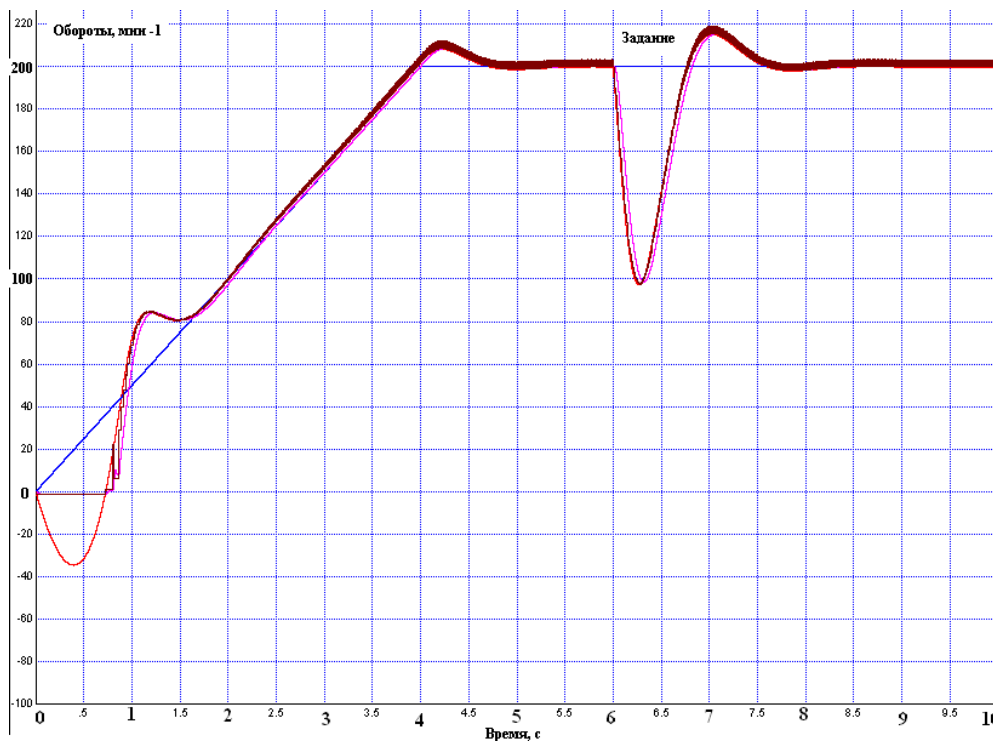


Рис.4 – Переходные процессы в системе с  $z = 45$

Многочисленные экспериментальные исследования на стендах и в эксплуатационных условиях, проведенные непосредственно при участии авторов, показали хорошее совпадение с теоретическими выкладками настоящей работы относительно практического выбора числа зубьев в измерительной шестерне.

Следует отметить, что предложенная методика учета влияния инерционности канала измерения

частоты вращения на показатели качества регулирования была использована авторами на практике при модернизации электронного регулятора угловой скорости дизель-генератора чешского производства ЧМЭ-3. Описанная методика может быть применена и во многих других случаях, когда шестерня для измерения частоты вращения вала дизель-генератора имеет всего лишь несколько зубьев.

**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

**Список литературы:** 1. *Абрамчук Ф. И.* Опыт конвертации дизелей в газовые двигатели с искровым зажиганием. / *Ф. И. Абрамчук, А. М. Левтеров* // Журнал «Автомобильный транспорт». – 2007. – №21. – С.15–23. 2. *Щеглов А. А.* Регулирование частоты вращения судового двигателя внутреннего сгорания. / *А. А. Щеглов* // Вестник МГТУ. – 2006. – Т. 9 – №2. – С. 312–317 3. *Косов Е. Е.* Совершенствование режимов работы силовых энергетических систем тепловозов / *Е. Е. Косов, Е. М. Шапран, В. В. Фурман* // Издавн. СНУ ім. В. Даля. – Луганськ: СНУ. – 2006. – С. 278. 4. *Пойда А. М.* Моделирование переходных процессов тепловозного дизеля в эксплуатационном цикле с метою встановлення шляхів зниження витрат палива. / *А. М. Пойда, Д. Г. Сівих, Р. М. Карсекин*, // Н.-тех. звіт. №0199U003102. – Харків. – ХарДАЗТ. – 2001. – 96 С. 5. *Цыткин Я. З.* Теория нелинейных импульсных систем. / *Я. З. Цыткин, Ю. С. Попков* // Москва, Гл. ред. физ.-мат. литературы издательства «Наука». – 1973. – 416 С. 6. *Богаевский А. Б.* Компьютерная модель мощного транспортного дизель-генератора с электронной системой управления. / *А. Б. Богаевский* // Открытые информационные и компьютерные интегральные технологии. – Харьков. – Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2008. – вып. 38. – С. 150–169. 7. *Воронов А. А.* Теория автоматического управления. Ч. 2 / *А. А. Воронов* // М. Высшая школа. – 1986. – 504 С.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Abramchuk, F. I., A. M. Levterov* *Opyt konvertatsii dizelej v gazovye dvigateli s iskrovym zazhiganiem.* [Experience of converting of diesels in gas engines with the spark lighting]. Zhurnal «Avtomobil'nyj transport», vyp. no 21/2007. Print.

**Богаевский Александр Борисович** – доктор технических наук, Харьковский Национальный автомобильный университет, профессор кафедры «Автомобильная электроника», тел. (057)7161466.

**Bogaevskij Aleksandr Borisovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kharkov National Automobile and Highway University, professor at the department of Automobile Electronics, tel.: (057) 7161466.

**Борисенко Анатолий Николаевич** – доктор технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Теоретические основы электротехники», тел.: (057)7076961.

**Borisenko Anatolij Nikolaevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", professor at the department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, tel.: (057)7076961.

**Кубрик Борис Иванович** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», тел.: (057)7076961.

**Kubrik Boris Ivanovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, tel.: (057)7076961.

**Литвиненко Светлана Анатольевна** – кафедра «Теоретические основы электротехники», старший преподаватель, (057) 7076961, e-mail: [svetlitvinenkoua@gmail.com](mailto:svetlitvinenkoua@gmail.com).

**Litvinenko Svetlana Anatol'evna** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", head lecturer at the department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, tel.: (057)7076961, e-mail: [svetlitvinenkoua@gmail.com](mailto:svetlitvinenkoua@gmail.com).

**Борисенко Евгений Анатольевич** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Информационно-измерительные технологии и системы», тел.: (057) 7076180, e-mail: [4borisea@gmail.com](mailto:4borisea@gmail.com)

**Borisenko Evgenij Anatol'evich** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the department of Information-measuring system, tel. (057) 7076180, e-mail: [4borisea@gmail.com](mailto:4borisea@gmail.com).

Поступила (received) 23.02.2016