

УДК 629.424.3: 621.314.12

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.160.2016.70021>

**ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ  
МОЩНОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ОТ ЧИСЛА ЗУБЬЕВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ  
ШЕСТЕРНЕ**

Д-р техн. наук А.Б. Богаевский, канд. техн. наук А.В. Осичев

**ЗАЛЕЖНІСТЬ ПОКАЗНИКІВ РЕГУЛЮВАННЯ ПО ЧАСТОТІ ОБЕРТАННЯ  
ПОТУЖНОГО ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ВІД КІЛЬКОСТІ ЗУБЦІВ У  
ВИМІРЮВАЛЬНІЙ ШЕСТИРНІ**

Д-р техн. наук О.Б. Богаевский, канд. техн. наук О.В. Осичев

**DEPENDENCE REGULATION INDICATORS FOR SPEED POWERFUL DIESEL-  
GENERATOR BY MEASURING THE NUMBER OF TEETH IN THE GEAR**

Doct. of techn. sciences A. Bogajevskij, cand. of techn. sciences A. Osichev

*Проведено исследование влияния запаздывания по измерению частоты вращения на показатели устойчивости и точности регулирования мощной дизель-генераторной установки с импульсным датчиком частоты в обратной связи. 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:** дизель-генератор, автоматическое регулирование, частота, запаздывание, устойчивость, число зубьев, точность регулирования, измерительная шестерня.

*Виконано дослідження впливу запізнення по виміру частоти обертання на показники стійкості і точності регулювання потужної дизель-генераторної установки з імпульсним датчиком частоти у зворотньому зв'язку. На підставі критерію Найквіста визначена мінімально допустима кількість зубців у вимірювальній шестірні. Отримано практичні*

співвідношення для визначення кількості зубців, необхідної для забезпечення заданої точності регулювання.

**Ключові слова:** дизель-генератор, автоматичне регулювання, частота, запізнення, стійкість, кількість зубців, точність регулювання, вимірвальна шестірня.

*The aim of this study is to investigate the influence of the number of teeth  $z$  in the measurement gear on the stability and accuracy of frequency control process. The correct choice of the number of teeth on the measuring gear is an important technical problem in the process of introduction of modern control systems on vehicles and power plants, which do not have ring gear on the flywheel (conventional place for such systems Frequency location pulse sensors), as well as the launch of diesel engines is carried out with compressed air instead of starter as in railway diesel engines and industrial applications. Such crown design for reliable operation of sensors must be created in the process of repair of the diesel engine or the installation of the system directly to the diesel unit before commissioning. By reducing the number of teeth (marks) for reading the information on the frequency may be reduced labor at this stage.*

*The use of chain measuring frequency pulse generators, removing discrete time information from the rotating gear teeth, leads to rotation speed control system of diesel generators in the formation of the delay unit. The effect of the delay on the measurement of frequency stability performance and precision control 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. Received practical expression to determine the number of teeth to provide the desired control accuracy.*

**Keywords:** diesel-generator, automatic regulation, frequency, delay, stability, number of teeth, precision control, the measuring gear.

**Введение и постановка проблемы в общем виде, 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 [1].

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 возрастет 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.

Отдельными вопросами регулирования и оптимизации различных гибридных энергетических установок (к которым относятся мощные дизель-генераторы) занимаются и зарубежные исследователи, в частности [9,10]. Однако их исследования проводятся в предположении, что основные показатели регулирования уже обеспечены существующей конструкцией регулятора. Поэтому в этих исследованиях вопросы, связанные с выбором конструктивных элементов как энергетической установки, так и модернизируемого регулятора, не освещаются.

**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  $\tau_{зан}$  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:

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

Структурная схема одноконтурной САУ со звеном запаздывания в цепи

$$W(j\omega) \cdot e^{-j\omega\tau_{зан}} = A(\omega) \cdot e^{j\phi(\omega)} \cdot e^{-j\omega\tau_{зан}} = A(\omega) \cdot e^{j(\phi(\omega) - \omega\tau_{зан})} \quad (2)$$

где  $A(\omega)$  – амплитудная составляющая АФЧХ,

$\phi(\omega) - \omega\tau_{зан}$  – фазовая составляющая АФЧХ.

Из выражения (2) видно, что звено запаздывания не меняет модуль  $A(\omega)$  АФЧХ разомкнутой системы, а вносит дополнительный отрицательный фазовый сдвиг  $\omega\tau_{зан}$ , пропорциональный частоте  $\omega$  с коэффициентом пропорциональности, равным времени запаздывания  $\tau_{зан}$ .

Критические условия устойчивости для фаз имеют вид:

$$\phi(\omega_{кр}) - \omega_{кр} \tau_{зан} = -\pi, \quad (3)$$

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

измерения частоты вращения может быть представлена в виде, как показано на рис. 1.

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.

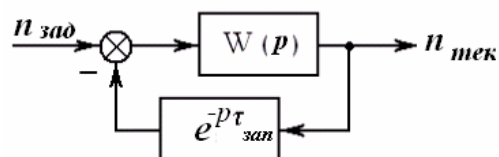


Рис. 1. Структурная схема одноконтурной САУ со звеном чистого запаздывания

Выражение для АФЧХ разомкнутой системы в этом случае:

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

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

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

$$\phi_{зан}(\omega) = \omega \cdot \tau_{зан} = \frac{2 \cdot \pi}{z}. \quad (6)$$

Преобразования (4) – (6) показывают, что фазовый сдвиг, вносимый звеном запаздывания, зависит от числа зубьев  $z$ . Из выражения (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 выражению (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 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 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  $z = 2$  представлены на 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  $n_{тек}$ . Частота следования импульсов с датчика определяется из выражения

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

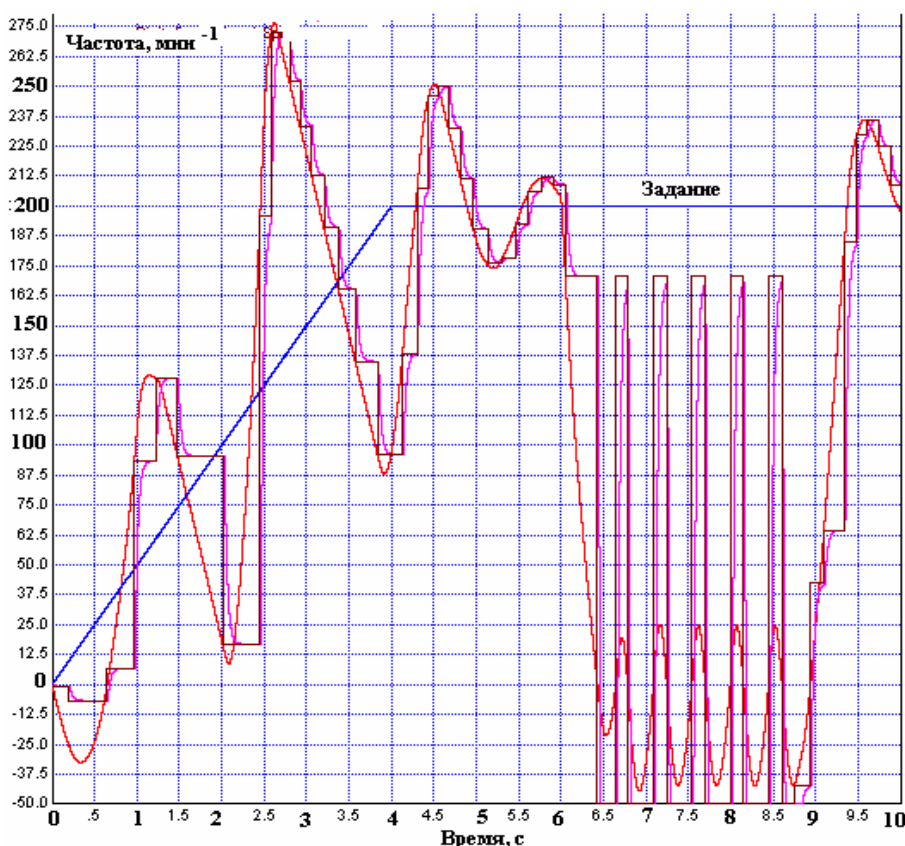


Рис. 2. Процессы в системе с  $z=2$  без перестройки параметров

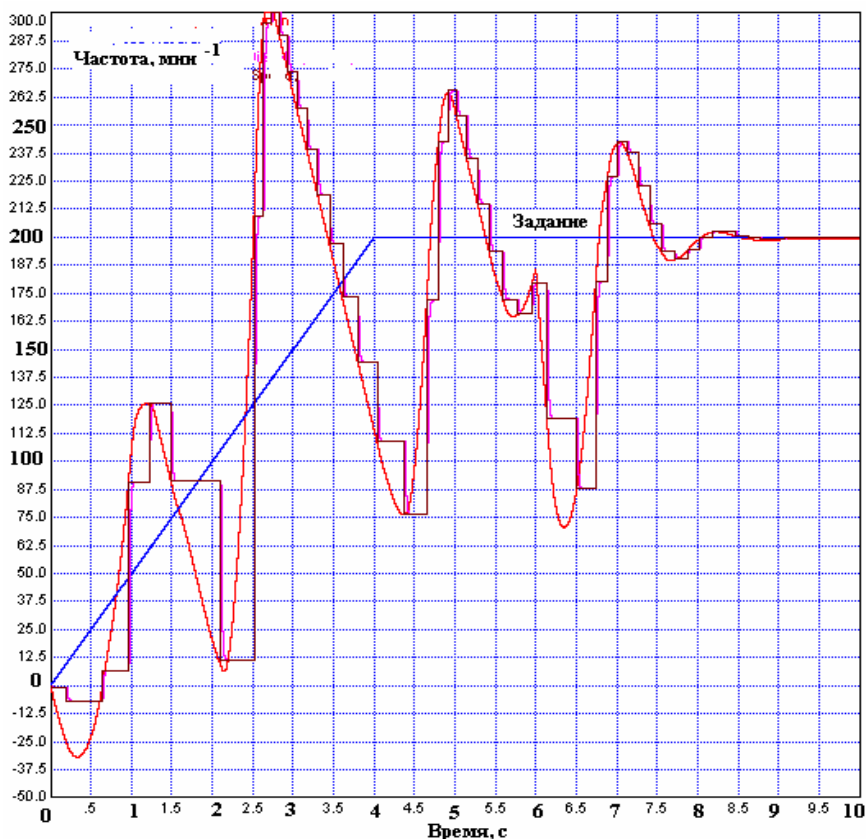


Рис. 3. Процессы в системе с  $Z=2$  с перестройкой параметров

Если диапазон регулирования частоты широк (что характерно для транспортных дизель-генераторных установок), то выбирать количество зубьев необходимо для минимальной частоты вращения  $n_{мин}$ . 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:

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

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

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

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

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

Полученное выражение (9) фактически для электромеханической системы представляет собой частоту полосы пропускания. В этом случае через выражение частоты полосы пропускания, согласно [8], можно представить выражение для времени  $t_{mn}$  переходного

процесса исполнительного механизма системы регулирования в следующем виде:

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

Для известных исполнительных механизмов (актуаторов) дизель-генераторных установок различного назначения время  $t_{nn}$  переходного процесса составляет величину в пределах от 0,05 до 0,2 с в зависимости от конструкции. Приняв значение  $t_{nn}$  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.

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.

**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 использованных источников

1. Гудков, С.А. Когенерация, использование когенерационных установок [Электронный ресурс] / С.А. Гудков, Е.А. Лебедева. – Нижний Новгород, РФ, ННГАСУ. – Режим доступа: [www.rae.ru/forum2012/pdf/2930.pdf](http://www.rae.ru/forum2012/pdf/2930.pdf).
2. Абрамчук, Ф.И. Опыт конвертации дизелей в газовые двигатели с искровым зажиганием [Электронный ресурс] / Ф.И. Абрамчук, А.М. Левтеров // Автомобильный транспорт. – 2007. – Вып. 21. – Режим доступа: <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 [Электронный ресурс] / А.А. Щеглов // Вестник МГТУ, 2006. – Т. 9, №2. – С. 312-317. – Режим доступа: [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 [Текст] / Е.Е. Косов, Е.М. Шапран, В.В. Фурман. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2006. – 278 с.
5. Моделювання перехідних процесів тепловозного дизеля в експлуатаційному циклі з метою встановлення шляхів зниження витрат палива [Текст]: наук.-техн. звіт. № 0199U003102. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. – 96 с.
6. Цыпкин, Я.З. Теория нелинейных импульсных систем [Текст] / Я.З. Цыпкин, Ю.С. Попков. – М.: Гл. ред. физ.-мат. литературы издательства «Наука», 1973. – 416 с.
7. Богаевский, А.Б. Компьютерная модель мощного транспортного дизель-генератора с электронной системой управления [Текст] / А.Б. Богаевский // Открытые информационные и компьютерные интегральные технологии. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2008. – Вып. 38. – С. 150-169.
8. Воронов, А.А. Теория автоматического управления [Текст] / А.А. Воронов. – М.: Высшая школа, 1986. – Ч. 2. – 504 с.
9. Bansal, R.C. Automatic reactive-power control of isolated wind-diesel hybrid power systems / R.C. Bansal // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2006. – Issue 4(6). – P. 1116-1126.

10. Tang Q., Lin N., Zhang J. Optimal Operation Method for Microgrid with Wind/PV/Diesel Generator/Battery and Desalination / Q. Tang, N. Lin, J. Zhang // Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics Volume 2014, Article ID 857541, 12 p., <http://dx.doi.org/10.1155/2014/857541>.

---

Богаєвський Олександр Борисович, доктор технічних наук, професор, кафедра автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Тел. (057) 700-38-52.  
Осічев Олександр Васильович, кандидат технічних наук, професор, кафедра автоматизованих електромеханічних систем Національного технічного університету «ХПІ». Тел. (057) 707-64-45.  
E-mail: avo1957@yandex.ru.

Bogaevskiy Aleksandr Borisovich, d-r of techn. sciences, professor department of automotive electronics Kharkov National Automobile - Highway University. Tel.: (057) 700-38-52.  
Osichev Aleksandr Vasilevich, cand. of techn. sciences, professor department of automated electromechanical systems of the National Technical University "KhPI". Tel.: (057) 707-64-45. E-mail: avo1957@yandex.ru.

Принята 22.03.2016 р.