

**В. Н. Дворак**, асп.

## **СТАБИЛИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ГЕНЕРАТОРОВ**

*Решена задача стабилизации динамических характеристик системы автоматического регулирования частоты вращения дизель-генератора в условиях параллельной работы его с другими генераторами с применением регулятора скользящего режима совместно с фаззи-регулятором. Спроектирован контур регулирования распределения активной мощности между параллельно работающими на потребителя генераторами.*

### **Общая постановка проблемы**

В качестве источника электрической энергии на судах применяются автоматизированные дизель-генераторные агрегаты (ДГА). Для регулирования частоты напряжения генератора (частоты вращения дизеля) применяются регуляторы частоты вращения (РЧВ) дизеля. Для уменьшения колебаний в судовой электрической сети в судовой электростанции применяют однотипные генераторы и дизели. Однако характеристики даже однотипных дизелей могут быть различными. Поэтому на этапе постройки судов, даже одинакового проекта, требуется индивидуальная настройка РЧВ. На характеристики дизеля влияют условия окружающей среды и различные эксплуатационные факторы [1]. На динамические характеристики ДГА большое влияние оказывает величина и характер нагрузки и количество параллельно работающих генераторов.

В результате изменения динамических характеристик ДГА переходный процесс изменения частоты напряжения генератора может затягиваться во времени, и даже быть неустойчивым в зависимости от значения фактора устойчивости. Для стабилизации динамических характеристик контура регулирования частоты необходимо периодически подстраивать РЧВ дизеля.

### **Обзор публикаций**

В [2] были исследованы вопросы устойчивости работы генераторов СЭЭС и даны рекомендации практического характера по повышению устойчивости СЭЭС. В [3] исследованы эксплуатационные факторы, влияющие на работу судовых дизелей, изложено много экспериментальных и практических данных. Также автором была проанализирована судовая документация регуляторов частоты вращения современных судовых дизелей с микропроцессорным управлением.

Для повышения устойчивости судовой электростанции необходимо стабилизировать динамические характеристики дизель-генераторов при действии дестабилизирующих факторов: параметров электрической нагрузки, количества параллельно работающих генераторов, и внешних возмущающих сигналов, влияющих на работу дизеля [1]. Для стабилизации динамических характеристик ДГА эффективным является регулятор скользящего режима [1]. В то же самое время, в реальных условиях идеальный скользящий режим невозможен, поскольку параметры реального скользящего режима зависят от скрытых параметров системы и возникают биения, т. е. высокочастотные колебания в окрестности точки равновесия [4]. Убрать эти колебания представляется возможным с помощью фаззи-регулятора [5].

### **Постановка задачи исследования**

В данной работе была поставлена задача добиться с использованием регулятора скользящего режима и фаззи-регулятора стабильности динамических характеристик автоматизированного ДГА в условиях параллельной работы с другими генераторами при случайных изменениях дестабилизирующих факторов.

**Изложение основного материала**

Для учёта влияния других генераторов на работу одного генератора, рассмотрим эквивалентную схему на рис. 1а. На рисунке обозначены  $i_{r1d}$ ,  $i_{r1q}$  — составляющие вектора тока генератора Г1 по продольной и поперечной оси;  $i_{hd}$ ,  $i_{hq}$  — составляющие вектора тока нагрузки  $i_h$  по осям  $d$  и  $q$  Г1 генератора. Другие генераторы, работающие параллельно с рассматриваемым Г1, подпитывают нагрузку током  $i_{r2}$ ,  $i_{r2d}$ ,  $i_{r2q}$  — проекции тока  $i_{r2}$  на оси генератора Г1.  $E_{rd1}$  и  $E_{rq1}$  — составляющие ЭДС генератора Г1.

Структура уравнений Парка — Горева такова, что не учитывает влияние токов  $i_{r2d}$ ,  $i_{r2q}$ . Для того чтобы учесть их влияние, используем коэффициенты  $K_d = \frac{i_{hd}}{i_{r1d}}$ ,  $K_q = \frac{i_{hq}}{i_{r1q}}$ , которые учитывают

влияние токов  $i_{r2d}$ ,  $i_{r2q}$  в уравнениях Парка — Горева для Г1. Коэффициенты  $K_d$ ,  $K_q$  учитывают фазовый сдвиг между токами  $i_{r1}$ ,  $i_h$  и отношение их величин, а результирующий ток  $i_h$  зависит от токов  $i_{r1}$ ,  $i_{r2}$ .

Расчёты предлагается вести по схемам, приведённым на рис. 1б. Особенности этих схем в том, что режим работы — короткое замыкание, когда  $U_d = 0$ ,  $U_q = 0$ , а сопротивления нагрузки отнесенные к статору:

$$X_{dh} = X_s + X_{ad} \cdot K_\mu + K_d \cdot X_h; \quad X_{qh} = X_s + X_{aq} \cdot K_\mu + K_q \cdot X_h;$$

$$R_{sq} = K_R \cdot R_s + K_q \cdot R_h; \quad R_{sd} = K_R \cdot R_s + K_d \cdot R_h.$$

Активные и реактивные составляющие падения напряжения на нагрузке  $X_h$ ,  $R_h$  по осям  $d$ ,  $q$  с учётом введённых коэффициентов  $K_d$ ,  $K_q$  равны:

$$X_h \cdot i_{hq} = (X_h \cdot K_q) \cdot i_{r1q}; \quad X_h \cdot i_{hd} = (X_h \cdot K_d) \cdot i_{r1d};$$

$$R_h \cdot i_{hq} = (R_h \cdot K_q) \cdot i_{r1q}; \quad R_h \cdot i_{hd} = (R_h \cdot K_d) \cdot i_{r1d}.$$

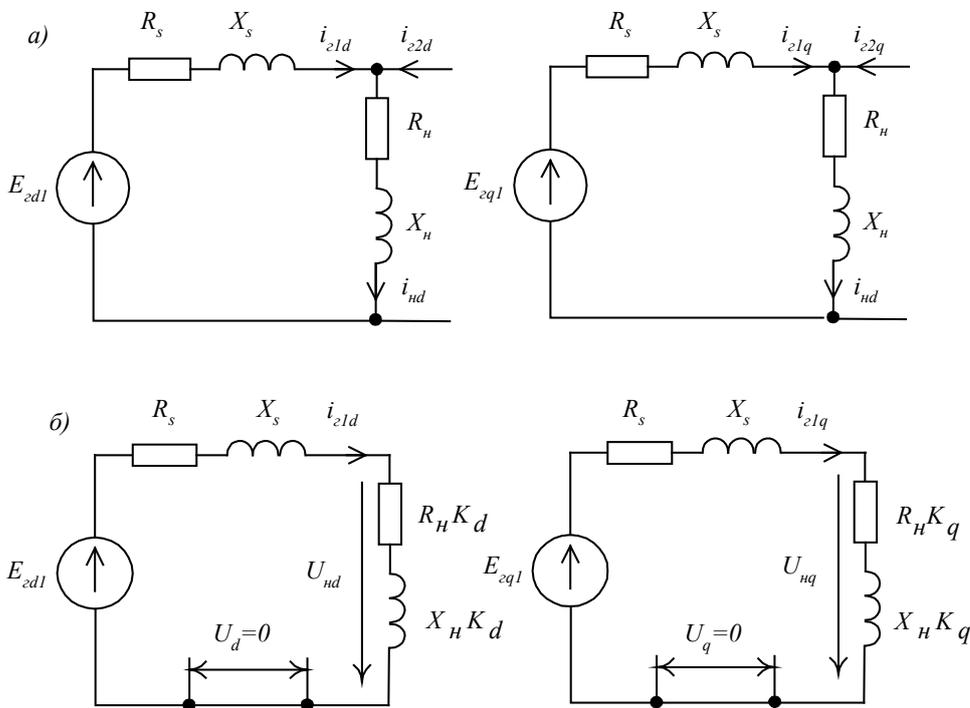


Рис. 1. Эквивалентные схемы генератора, работающего параллельно с другими генераторами (а); преобразованные схемы для расчёта напряжения на нагрузке (б)

Сопротивления  $X_{dh}$ ,  $X_{qh}$ ,  $R_{sq}$ ,  $R_{sd}$  подставляются в уравнения Парка — Горева. Из уравнений выводится формула для расчёта частной производной момента генератора по частоте вращения

$$\frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial \omega} = \frac{\left( 3 \frac{\omega^2}{\omega_c^3} X_{qH}^2 + R_{sq} R_{sd} \frac{1}{\omega_c} \right) \cdot \left( X_{qH} X_{dH} \frac{\omega^2}{\omega_c^2} + R_{sq} R_{sd} \right) - \rightarrow}{\rightarrow \frac{-4 X_{qH} X_{dH} \frac{\omega}{\omega_c^2} \left( \frac{\omega^3}{\omega_c^3} X_{qH}^2 + R_{sq} R_{sd} \frac{\omega}{\omega_c} \right)}{\left( X_{qH} X_{dH} \frac{\omega^2}{\omega_c^2} + R_{sq} R_{sd} \right)^3} \cdot M_{\text{НОМ}} R_{sd} (X_{ad} K_{\mu} i_f)^2}, \quad (1)$$

где  $K_{\mu} = 0,104 \dots 1$  — коэффициент, характеризующий намагничивание железа и, следовательно, изменение сопротивлений взаимной индукции  $X_{ad}, X_{aq}$ ;  $K_R = 0,725 \dots 1,165$  — коэффициент, характеризующий изменение активного сопротивления обмоток от температуры; значения  $K_d$  и  $K_q$  приняты в пределах  $-8 \dots 8$ , в зависимости от угла между векторами тока нагрузки и генератора, количества параллельно работающих генераторов.

Структурная схема системы автоматического управления (САУ) частотой вращения, имеющая третий порядок, представлена в работе [1].

Частная производная влияет на фактор устойчивости ДГА. Значение частной производной  $\frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial \omega}$  зависит от частоты вращения  $\omega$ ,  $K_{\mu}$ ,  $K_R$ , тока возбуждения  $i_f$ ,  $K_d$  и  $K_q$ . Частная производная изменяет своё значение в зависимости от реактивной и активной мощностей нагрузки, т. е. от  $X_{\mu}$ ,  $R_{\mu}$ . В зависимости от величины  $X_{\mu}$ ,  $R_{\mu}$ ,  $\omega$ ,  $i_f$ ,  $K_d$  и  $K_q$  значение  $\frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial \omega}$  лежит в пределах  $-0,466 \dots 1,805$ .

При различных значениях коэффициента магнитной проницаемости железа, температуры обмоток, нагрузки, количества параллельно работающих генераторов графики переходного процесса изменения частоты напряжения генератора имеют различную свободную составляющую переходного процесса (рис. 2). При большом положительном значении фактора устойчивости переходной процесс затягивается во времени, а при отрицательном САУ становится неустойчивой.

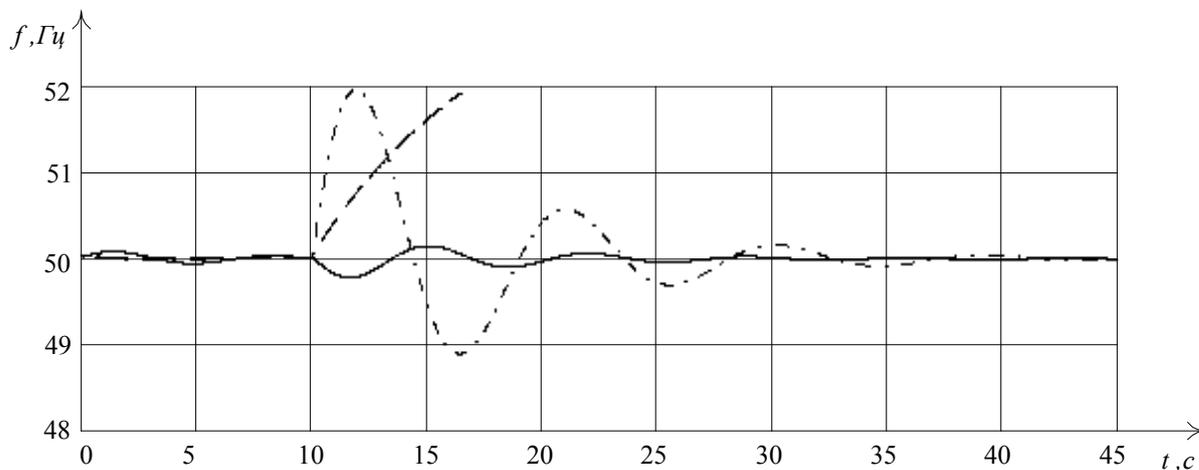


Рис. 2. График переходного процесса изменения частоты напряжения генератора:

\_\_\_\_\_ при  $K_{\mu} = 1$ ;  $K_R = 1$ ;  $K_d = 2,5$ ;  $K_q = 1,3$ ;  $R_{\mu} = 0,79$ ;

----- при  $K_{\mu} = 0,9$ ;  $K_R = 1,2$ ;  $K_d = 3$ ;  $K_q = 1,2$ ;  $R_{\mu} = 1$ ;

Для того чтобы переходной процесс изменения частоты напряжения генератора имел постоянные динамические характеристики при любых значениях дестабилизирующих факторов, применим регулятор скользящего режима. Методика проектирования регулятора скользящего режима описана в работе [1]. Эквивалентная САУ частотой стала инерционным звеном первого порядка с постоянными динамическими характеристиками.

Для погашення колибаний, обумовлених використанням регулятора скользящего режима, при-  
 меним фаззи-регулятор с треугольной функцией принадлежности [5]. Результаты моделирования  
 переходного процесса САУ частотой напряжения ДГА с применением регулятора скользящего  
 режима совместно с фаззи-регулятором представлены на рис. 3. При тех же значениях дестабили-  
 зирующих факторов САУ частотой имеет неизменную постоянную времени, уменьшилось перере-  
 гулирование, переходной процесс протекает как у инерционного звена первого порядка. Амплиту-  
 да колебаний частоты зависит от изменения величины и характера нагрузки, количества параллель-  
 но работающих генераторов, температуры обмоток, магнитной проницаемости железа.

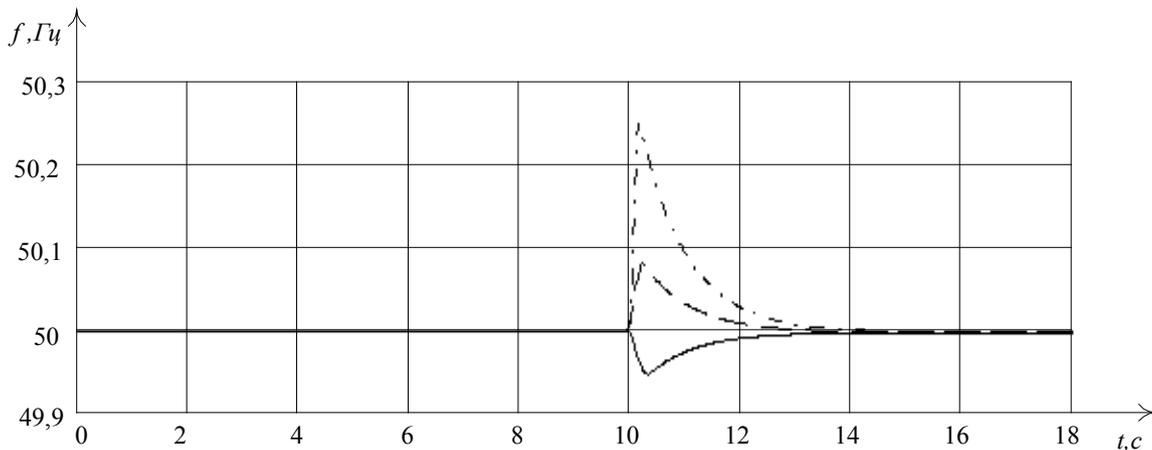


Рис. 3. График переходного процесса САУ частотой напряжения генератора с регулятором скользящего режима и фаззи-регулятором:

———— при  $K_{\mu} = 1; K_R = 1; K_d = 2,5; K_q = 1,3; R_n = 0,79;$

- - - - при  $K_{\mu} = 0,9; K_R = 1,2; K_d = 3; K_q = 1,2; R_n = 1;$

Активная мощность и частота напряжения генератора регулируется изменением подачи топли-  
 ва дизеля. При регулировании мощности изменяется угол нагрузки генератора. Введём в САУ  
 частотой ещё И-регулятор как на рис. 4. Целью такого введения является то, чтобы сигнал на из-  
 менение активной мощности  $\Delta P_{зад}$ , поданный после И-регулятора в контур регулирования частоты,  
 не повлиял на установившееся значение частоты генератора. При таком способе введении сиг-  
 нала  $\Delta P_{зад}$ , САУ частотой инвариантна по отношению к сигналу  $\Delta P_{зад}$ . Изображенная на рис. 4  
 САУ частотой настроена на технический оптимум с перерегулированием 4,3 %, временем регули-  
 рования 4,7T. Для придания такого свойства САУ И-регулятор имеет постоянную времени 2T.

Для уменьшения перерегулирования по частоте в контур регулирования мощности вводим инер-  
 ционно-интегрирующее звено. Постоянная времени  $T_p$  во много раз больше T. В начале переходного  
 процесса сигнал  $\Delta P_{зад}$  будет изменяться с нулевой скоростью, а спустя время 3τ со скоростью, опре-  
 деляемой  $T_p$ . Распределение мощности параллельно работающих генераторов влияет только на  
 износ дизелей и общую экономичность электростанции. Поэтому можно допускать небольшую по-  
 грешность регулирования активной мощности генератора. Для того чтобы малая ошибка регулирова-  
 ния по мощности δ не влияла на динамику САУ частотой, введём зону нечувствительности  
 регулирования по мощности с помощью трёхпозиционного реле (рис. 4). При постоянном сигнале σ  
 на выходе трёхпозиционного реле сигнал  $\Delta P_{зад}$  будет изменяться с постоянной скоростью незави-  
 симо от величины сигнала δ и это объясняет постоянство формы графика частоты.

На рис. 4 Pω – обобщенный сигнал регулирования частоты и мощности генератора, подавае-  
 мый на сервопривод топливной рейки дизеля. Заданная активная мощность генератора  $P_{зад}$  опре-  
 деляется по формуле

$$P_{зад} = \frac{P_{спр}}{\sum P_{спр}} P_n, \tag{2}$$

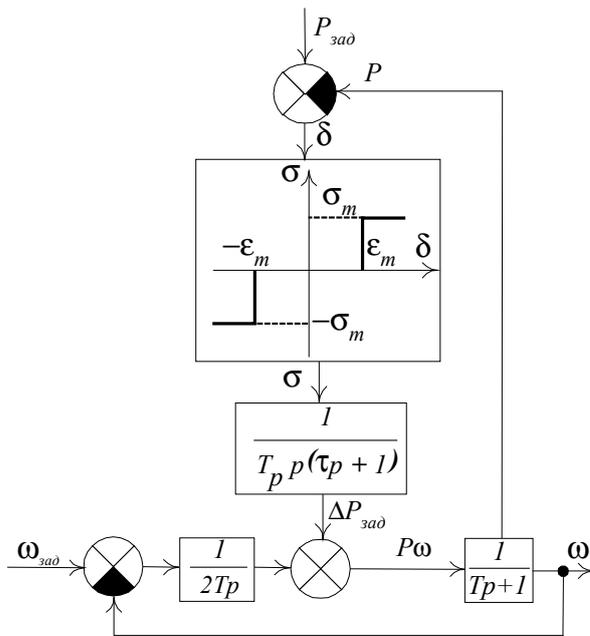


Рис. 4. САУ активной мощностью генератора

частоты напряжения генератора протекает во всех случаях как у звена второго порядка с неизменными динамическими характеристиками.

где  $P_{\text{спр}}$  — справочная активная мощность генератора,  $\Sigma P_{\text{спр}}$  — сумма справочных активных мощностей всех генераторов, работающих параллельно;  $P_{\text{н}}$  — активная мощность нагрузки всей электростанции.

Если мощность генератора  $P$  отличается от  $P_{\text{зад}}$  более чем на  $\epsilon_m$ , то сигнал  $\Delta P_{\text{зад}}$  изменяется, происходит изменение входного сигнала  $P\omega$  САУ частотой напряжения с регулятором скользящего режима, изменяется подача топлива, что приводит к изменению угла нагрузки.

Моделирование переходного процесса изменения частоты напряжения генератора представлено на рис. 5а, а активной мощности генератора — на рис. 5б при его параллельной работе с другими генераторами и различных значениях дестабилизирующих факторов: коэффициента магнитной проницаемости железа  $K_{\mu}$ ; коэффициента  $K_R$ , характеризующего изменение сопротивления обмоток от температуры; активной нагрузки судовой сети  $R_{\text{н}}$ ; взаимного положения векторов тока нагрузки и генератора  $K_d, K_q$ . Изменение

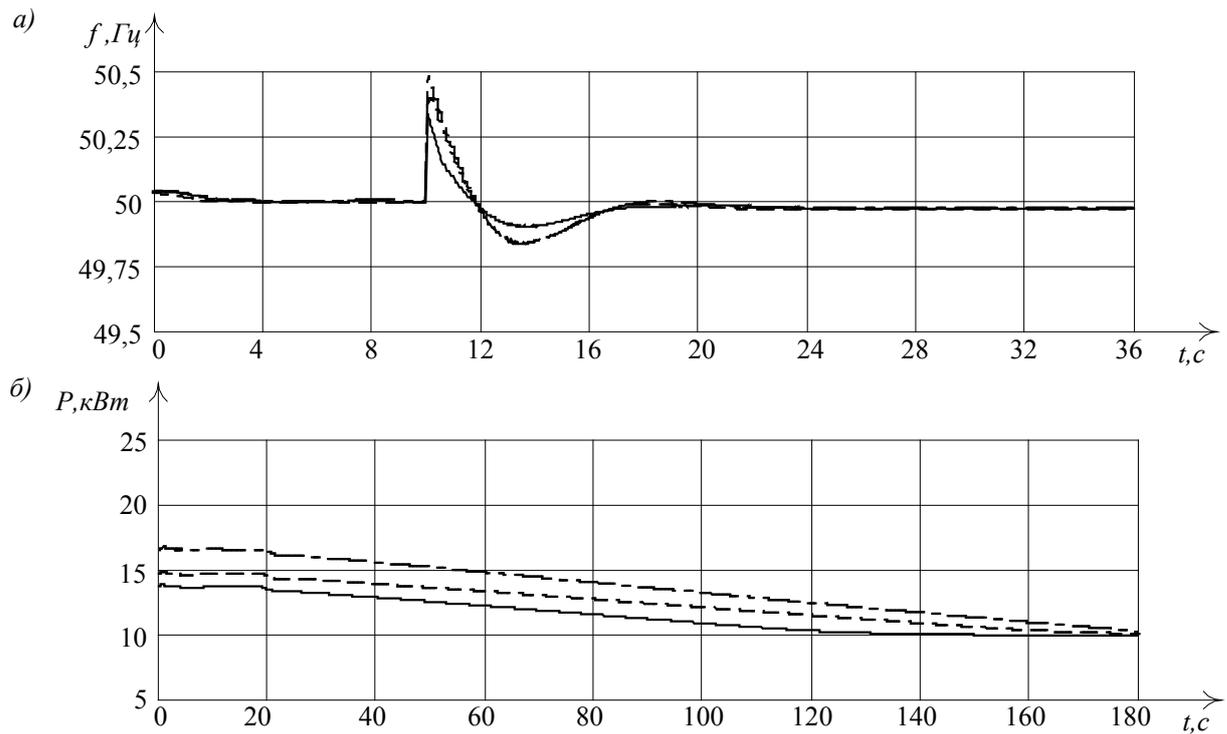


Рис. 5. График переходного процесса изменения частоты напряжения генератора (а), и активной мощности генератора (б):

\_\_\_\_\_ при  $K_{\mu} = 1$ ;  $K_R = 1$ ;  $K_d = 2,5$ ;  $K_q = 1,3$ ;  $R_{\text{н}} = 0,79$ ;

----- при  $K_{\mu} = 0,9$ ;  $K_R = 1,1$ ;  $K_d = 1,5$ ;  $K_q = 1,2$ ;  $R_{\text{н}} = 0,79$ ;

## Выводы

1. Применение регулятора скользящего режима позволило стабилизировать динамические характеристики переходного процесса изменения частоты напряжения генератора при любых значениях дестабилизирующих факторов в условиях параллельной работы с другими генераторами. При тех же значениях дестабилизирующих факторов без регулятора скользящего режима наблюдаются колебания большой амплитуды, возможна даже потеря устойчивости.

2. Скомпенсировано взаимное влияние параллельно работающих генераторов друг на друга за счёт формирования одинаковых динамических характеристик генераторов. Благодаря указанному совпадению динамических характеристик отсутствует колебательный переток мощности между параллельно работающими генераторами.

3. Переходные процессы, происходящие в контуре регулирования мощности, не влияют на переходные процессы в контуре частоты. Наличие регулирующих сигналов по мощности не влияют на динамику контура частоты. Для ограничения заброса на графике частоты при регулировании мощности введён задатчик интенсивности в виде инерционно-интегрирующего звена и трёхпозиционное реле.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дворак В. Н. Стабилизация динамических характеристик автоматизированного дизель-генераторного агрегата // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Електротехніка і електромеханіка ЕТЕМ-2005». — Миколаїв 2005, — С. 16—21.
2. Болотин Б. И., Вайнер В. Л. Инженерные методы расчетов устойчивости судовых автоматизированных систем. — Л.: Судостроение, 1974. — 332 с.
3. Теоретические основы эксплуатации судовых дизелей / В. Ю. Гиттис, В. Л. Бондаренко, Т. П. Ефимов и др. — М.: Транспорт, 1965. — 376 с.
4. Усков А. А., Кузьмин А. В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечёткая логика. — М.: Горячая Линия — Телеком, 2004. — 143 с.
5. Колодяжний В. В., Дворак В. М. Синтез регулятора ковзного режима для системы збудження синхронного генератора // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. — 2006. — Вип. 40. — С. 41—47.

*Дворак Васильй Николаевич* — аспирант кафедри електрооборудовання судов и автоматизации производства.

Керченский морской технологический институт