

## Выводы

1. Разработана методика составления явных формул для функций Грина векторного и скалярного электрического потенциалов микрополосковой структуры по их спектральным представлениям. На ее основе получены простые формулы, требующие меньше вычислительных затрат на формирование импедансных матриц и обеспечивают высокую точность вычислений, подтверждающуюся результатами представленных расчетов.

2. Результаты работы могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования микрополосковых схем и антенн. В дальнейшем предполагается развитие и применение разработанной методики для решения задач по составлению явных зависимостей для спектральных функций коэффициентов отражения ТЕ и ТМ-волн, имеющих несколько полюсов, характеризующих поверхностные волны в микрополосковой структуре.

## Перечень ссылок

1. Katehi P., Alexopoulos N. G. Frequency-dependent characteristics of microstrip discontinuities in millimeter-wave integrated circuits // IEEE Trans. MTT. – 1985. – V. 33, № 10. – P. 1029–1035.
2. Tsai M. J., De Flaviis F., Fordham O., Alexopoulos N. G. Modeling planar arbitrarily shaped microstrip elements in multilayered media // IEEE Trans. MTT. – 1997. – V. 45, № 3. – P. 330–336.

3. Kinayman N., Aksum M. I. Efficient use of closed-form Green's functions for the analysis of planar geometries with vertical connections // IEEE Trans. MTT. – 1997. – V. 45, № 5. – P. 593–602.
4. Tsang L., Huang C., Chan C. H. Surface electric fields and impedance vathix elements jf stratified media // IEEE Trans. MTT. – 2000. – V. 48, № 10. – P. 1533–1543.
5. Yuehe Ge, Karu P. E. New closed-form Green's functions for microstrip structures – theory and results // IEEE Trans. MTT. – 2002. – V. 50, № 6. – P. 1556–1560.
6. Карпуков Л. М. Модель для расчета тензора Грина на микрополосковой структуре в пространственной области // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2001. – № 2. – С. 28–33.
7. Карпуков Л. М., Пиза Д. М. Метод составления функций Грина для моделирования микрополосковых конструкций // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2002. – № 2. – С. 20–25.
8. Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с.
9. Benedek P., Silvester P. Equivalent Capacitances for Microstrip Gaps and Steps. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1972. – Vol. 20, № 11. – P. 729–733.

Поступила в редакцию 08.02.07 г.

*Запропонований метод складання в замкнутій формі функцій Гріна векторного і скалярного електричних потенціалів багатоплощинного діелектричного середовища. Отримані аналітичні співвідношення для розрахунку поверхневого імпедансу мікросмужкової структури. Розглянута процедура алгебраїзації інтегрального рівняння і представлені результати розрахунку елементів мікросмужкових схем по запропонованих співвідношеннях.*

*The compilation method of Green functions of vector and scalar electric potentials of the multilayered dielectric medium in the closed shape is offered. Analytical ratios for a superficial impedance calculation of micro-strip structure are received. The algebraization procedure of the integrated equation is considered and results of the micro-strip circuitry elements calculation on the offered ratios are presented.*

УДК 639.2.06

В. М. Дворак, Д. І. Осовский

## Регулятор скользящего режима для управления частотой тока валогенератора

*В условиях параллельной работы валогенератора с генераторами судовой электростанции путем использования регулятора скользящего режима, функционирующего совместно с фаззи-регулятором, решена задача уменьшения колебаний частоты вращения и угла нагрузки валогенератора.*

В судовых электростанциях источником электроэнергии являются дизель-генераторы. В качестве привода гребного винта регулируемого шага (ВРШ) выступает главный двигатель (ГД), приводящий во вращение также валогенератор (ВГ). Для регулирования скорости судна механизм изменения шага поворачивают лопасти винта. Для регулирования частоты враще-

ния главного двигателя (и соответственно частоты тока валогенератора) применяют регуляторы частоты вращения (РЧВ) дизеля.

На переходный процесс изменения частоты тока ВГ влияют динамические характеристики дизеля, генератора, винта. В свою очередь, на характеристики дизеля оказывают влияние условия окружающей среды, из-

нос регулятора частоты вращения и различные эксплуатационные факторы [1]. Динамические характеристики генератора зависят от температуры обмоток, магнитной проницаемости стали, характера и величины нагрузки, количества параллельно работающих генераторов [2]. Гидродинамические характеристики винта изменяются в зависимости от различных дестабилизирующих факторов [3]: скорости движения судна, воздействия волн и ветра; поверхностных течений; коррозии и обрастания корпуса и винторулевого комплекса; ледовой обстановки; главных размеров судна; конфигураций надводной части корпуса и надстроек; положения центра парусности; режима работы судна (ход в грузу, в балласте, буксировка воя, траление, работа на швартовых и др.). Из-за износа деталей регулятора частоты вращения, нарушаются его настройки, изменяются динамические характеристики элементов системы автоматического управления (САУ) главного двигателя, что может привести к дополнительному увеличению колебаний его частоты вращения. Поэтому для уменьшения амплитуды этих колебаний периодические перенастраивают РЧВ.

Требования Регистра морского флота допускают кратковременные колебания частоты ВГ и ДГ в диапазоне не более  $\pm 10\%$  в течение 5 секунд, и длительные – в пределах не более  $\pm 5\%$ . При изменении динамических характеристик винта, генератора, двигателя из-за износа регулятора частоты вращения изменяется свободная составляющая переходного процесса частоты тока валогенератора. Переходный процесс изменения частоты вращения ГД (или частоты тока валогенератора) сопровождается колебаниями большой амплитуды) более 10 %) и затягивается во времени (более, чем на 5 секунд) в зависимости от условий плавания судна. Поэтому валогенератор не включают на постоянную параллельную работу с дизель-генераторами судовой электростанции, особенно, в штормовых условиях. В то же время включение на параллельную работу (ВГ) с дизель-генераторами судовой электростанции (ДГ) является экономически оправданным, так как уменьшает стоимость вырабатываемой электроэнергии на судне.

В известной научно-технической литературе вопросы подробного анализа и эффективного уменьшения колебаний частоты тока валогенератора исследованы недостаточно. В частности, в [3] исследовано влияние только внешних условий на характеристики винта. В книге [4] выполнено математическое моделирование переходного процесса частоты тока валогенератора в условиях волнения моря. В докладе [5] синтезирован регулятор скользящего режима для дизель-генератора без подробного его исследования. В монографии [6] даны рекомендации практического характера по обеспечению устойчивости судового электрооборудования. В книге [1] экспериментально исследованы эксплуатационные факторы, влияющие на работу судовых дизелей. Анализ существующей технической документации для САУ валогенераторов современных судов также показал, что вопросы эффективного управления частотой валогенераторов до настоящего времени мало изучены.

Данная статья посвящена исследованию эффективности использования регулятора скользящего режима и фаззи-регулятора для уменьшения колебаний частоты тока валогенератора при действии дестабилизирующих факторов при различных условиях плавания судна. Указанное уменьшение колебаний частоты тока ВГ служат для обеспечения длительной параллельной работы валогенератора с дизель-генераторами судовой электростанции.

В процессе эксплуатации главного двигателя технически трудно идентифицировать параметры дизеля и винта, влияющие на динамические характеристики нагруженного ГД. В таких условиях эксплуатации для стабилизации частоты вращения ГД наиболее эффективным является применение регулятора скользящего режима. При этом для работы САУ частотой вращения валогенератора с регулятором скользящего режима нет необходимости в идентификации параметров дизеля и винта, а лишь необходимо знать пределы их изменений. Причем, пределы изменений указанных параметров можно легко рассчитать или определить экспериментально. Для реализации алгоритма работы регулятора скользящего режима достаточно контролировать отклонение частоты вращения от заданного значения. При применении регулятора скользящего режима возникают высокочастотные и небольшие по амплитуде колебания частоты валогенератора (в окрестности установившегося значения регулируемой величины). Для уменьшения этих колебаний на практике эффективным является применение фаззи-регулятора [5].

В данной статье исследовался режим работы валогенератора с главным приводом на конкретном примере сейнера – траулера рефрижераторного типа «Альпинист», содержащего главный двигатель 8NVD48A2U (мощностью 970 кВт), валогенератор MCK 113-4 (мощностью 300 кВт, 1500 об/мин), винт ВРШ (с техническими характеристиками  $D = 2,15\text{ м}$ ;  $H/D = 0,9$ ;  $z = 3$ ;  $\theta = 0,57$ ;  $n = 250\text{ об/мин}$ ), три генератора судовой электростанции ГСС 114-8М (мощностью 150 кВт, 750 об/мин).

Линеаризованное уравнение динамики САУ частотой ГД при параллельной работе валогенератора с генераторами судовой электростанции имеет вид [4]:

$$J \cdot p \cdot \Delta\omega = \frac{\partial M_d}{\partial \omega} \cdot \Delta\omega + \frac{\partial M_d}{\partial h} \cdot \frac{1 + T_k \cdot p}{1 + T_k \cdot K_k \cdot p} \cdot \Delta h - \frac{\partial M_z}{\partial \omega} \cdot \Delta\omega - \frac{\partial M_z}{\partial R_n} \cdot \Delta R_n - \frac{\partial M_z}{\partial X_n} \cdot \Delta X_n - \frac{\partial M_z}{\partial i_f} \cdot \Delta i_f - a_1 \cdot \frac{\Delta H}{H_0} + a_4 \cdot f(t), \quad (1)$$

где  $f(t) = 2 \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega_0} - \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 + \left(1 - \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right) \cdot \left[ \gamma_a \cdot (1 - m_a) - \gamma_a \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right] \cdot \sin(\Omega \cdot t), \quad (2)$



$$\left. \begin{aligned}
 U_{pcp} &= U_{c\epsilon,\omega} \Psi_0 + \dot{U}_{c\epsilon,\omega} \Psi_1, \\
 \Psi_0 &= \begin{cases} \alpha_0 \text{ при } U_{c\epsilon,\omega} \left( \frac{U_{c\epsilon,\omega}}{T_{ж}} + \dot{U}_{c\epsilon,\omega} \right) \geq 0 \\ \beta_0 \text{ при } U_{c\epsilon,\omega} \left( \frac{U_{c\epsilon,\omega}}{T_{ж}} + \dot{U}_{c\epsilon,\omega} \right) < 0 \end{cases}; \\
 \Psi_1 &= \begin{cases} \alpha_1 \text{ при } \dot{U}_{c\epsilon,\omega} \left( \frac{U_{c\epsilon,\omega}}{T_{ж}} + \dot{U}_{c\epsilon,\omega} \right) \geq 0 \\ \beta_1 \text{ при } \dot{U}_{c\epsilon,\omega} \left( \frac{U_{c\epsilon,\omega}}{T_{ж}} + \dot{U}_{c\epsilon,\omega} \right) < 0 \end{cases};
 \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \alpha_0 &= \begin{cases} \frac{\varepsilon \cdot \alpha_{0\max}}{\lambda_{\alpha 0}} \cdot \text{sign}(\alpha_{0\max}) \text{ если } |\varepsilon| \leq \lambda_{\alpha 0}, \\ \alpha_{0\max} \text{ если } |\varepsilon| > \lambda_{\alpha 0} \end{cases}, \\
 \beta_0 &= \begin{cases} \frac{\varepsilon \cdot \beta_{0\max}}{\lambda_{\beta 0}} \cdot \text{sign}(\beta_{0\min}) \text{ если } |\varepsilon| \leq \lambda_{\beta 0}, \\ \beta_{0\min} \text{ если } |\varepsilon| > \lambda_{\beta 0} \end{cases}, \\
 \alpha_1 &= \begin{cases} \frac{\dot{\varepsilon} \cdot \alpha_{1\max}}{\lambda_{\alpha 1}} \cdot \text{sign}(\alpha_{1\max}) \text{ если } |\dot{\varepsilon}| \leq \lambda_{\alpha 1}, \\ \alpha_{1\max} \text{ если } |\dot{\varepsilon}| > \lambda_{\alpha 1} \end{cases}, \\
 \beta_1 &= \begin{cases} \frac{\dot{\varepsilon} \cdot \beta_{1\max}}{\lambda_{\beta 1}} \cdot \text{sign}(\beta_{1\min}) \text{ если } |\dot{\varepsilon}| \leq \lambda_{\beta 1}, \\ \beta_{1\min} \text{ если } |\dot{\varepsilon}| > \lambda_{\beta 1} \end{cases}
 \end{aligned} \right\} (7)$$

где  $T_{ж}$  – желаемая постоянная времени переходного процесса изменения частоты вращения ГД;  $U_{c\epsilon,\omega}$  – входной сигнал регулятора РСР.

Передаточная функция замкнутой САУ ГД имеет вид:

$$\begin{aligned}
 G_{ГД}(p) &= K_{инп} K_{ред} B \cdot \frac{\partial M_{д}}{\partial h} \cdot (1 + T_{к} p) / \\
 &\left[ K_{ТГ} p \cdot (1 + K_{к} T_{к} p) \cdot \left( Jp + \frac{\partial M_{з}}{\partial \omega} - \frac{\partial M_{д}}{\partial \omega} \right) + \right. \\
 &\left. + K_{инп} K_{ред} B \cdot \frac{\partial M_{д}}{\partial h} \cdot (1 + T_{к} p) \right], \quad (6)
 \end{aligned}$$

где  $B$  – коэффициент передачи сервопривода постоянного тока топливной рейки;  $K_{инп}$  – коэффициент передачи источника питания;  $K_{ред}$  – коэффициент передачи редуктора;  $K_{ТГ}$  – коэффициент передачи тахогенератора (датчика частоты вращения дизеля).

Посредством используемого регулятора скользящего режима структурная схема САУ частотой валогенератора преобразуется от звена третьего порядка к инерционному звену первого порядка с желаемой постоянной времени  $T_{ж}$ . Алгоритм функционирования фаззи-регулятора описывается следующим образом [2]:

где  $\varepsilon = \frac{u_{c\epsilon,\omega}}{u_{нр,\omega}}$ ;  $\alpha_{0\max}$ ,  $\alpha_{1\max}$ ,  $\beta_{0\min}$ ,  $\beta_{1\min}$  – коэффициенты, определяемые из коэффициентов передаточной функции (6);  $\lambda_{\alpha 0}$ ,  $\lambda_{\beta 1}$ ,  $\lambda_{\beta 0}$ ,  $\lambda_{\alpha 1}$  – коэффициенты, подбираемые из диапазона 0,03...0,15.

При изменении индуктивного  $X_{н}$  или активного  $R_{н}$  сопротивлений нагрузки, количества параллельно работающих генераторов, угла между векторами тока нагрузки и генератора, тока возбуждения изменяется угол нагрузки генератора и подача топлива. Это отображено в схеме САУ на рис. 1 тем, что сигналы компенсации действия нагрузки и тока возбуждения подаются на сумматор (перед передаточной функцией  $G_{ГД}(p)$ ). С учетом этого возмущающие сигналы по нагрузке и току возбуждения затем вычитаются из компенсирующих сигналов, показанных в схеме на рис. 1 после передаточной функции  $G_{ГД}(p)$ . В установившемся режиме производные от всех сигналов обращаются в нуль. Это эквивалентно тому, что в уравнении (6) надо принять:  $p=0$ . Тогда передаточная функция  $G_{ГД}(p)$  образуется в пропорциональное звено с коэффициентом передачи, равным единице. С учетом этого вынужденная составляющая частоты вращения ГД (частоты тока ВГ) не меняется, а изменяется только угол нагрузки синхронного генератора.

Со стороны гребного винта (ВРШ) действуют возмущающие сигналы, которые обусловлены гидродинамическими колебаниями момента на винте и колебаниями погружения винта. Соответствующие компенсирующие сигналы также подаются на сумматор перед передаточной функцией ГД и вычитаются из соответ-

ствующих возмущающих сигналов (после передаточной функции ГД). Следовательно, вынужденная составляющая частоты вращения ГД (частоты тока ВГ) при этом не меняется. Компенсирующие сигналы подаются также на сумматор (на входе регулятора скользящего режима) с фаззи-регулятора САУ главного двигателя, влияя на свободную составляющую выходного сигнала частоты вращения ГД (частоты тока ВГ). Все сигналы возмущения действуют на ГД, преодолевая инерцию дизеля, маховика, винта, валогенератора, гребного вала. Такое воздействие возмущающих сигналов исключает скачкообразное изменение частоты вращения ГД (частоты тока ВГ).

САУ на рис. 1 настроена на технический оптимум, для чего постоянная времени И – регулятора принята равной  $2 T_{ж}$ . Для САУ ГД, изображенной на рис.1, выполнено моделирование переходного процесса изменения частоты вращения ГД (частоты тока ВГ). Результаты данного моделирования частоты тока  $f$  валогенератора (рис. 2, а) и угла нагрузки  $\theta$  (рис. 2, б) в САУ ГД с регулятором скользящего режима и фаззи-регулятором показали, что амплитуда колебаний параметров  $f$  и  $\theta$  уменьшилась по сравнению с САУ ГД без регу-

лятора скользящего режима (рис. 3) при одинаковых значениях дестабилизирующих факторов: (частоте качки судна  $\Omega = 0,2 \dots 1 \text{ с}^{-1}$ ; гидродинамических колебаниях момента на винте и амплитуде колебаний погружения винта:  $\gamma_a = 1,21 \dots 27,25 \text{ о.е.}$ ,  $m_a = -2,7 \dots 1,08 \text{ о.е.}$ ; электрической нагрузки  $R_n = 0,75 \dots 1,1 \text{ о.е.}$  и  $X_n = 0,66 \dots 1,1 \text{ о.е.}$ ; токе возбуждения  $i_f = 0,8 \dots 1,043 \text{ о.е.}$ ; количестве параллельно работающих генераторов 2 или 3.

Без регулятора скользящего режима (рис. 3, б) амплитуда колебаний угла нагрузки превышает 180 градусов, а частота колебаний становится более 5 Гц (что опасно по причине «выпадения» возможного валогенератора из синхронизма). Благодаря уменьшению амплитуды колебаний частоты вращения ГД (частоты тока ВГ), амплитуда колебаний угла нагрузки  $\theta$  (рис. 2, б) для САУ с регулятором скользящего режима не превышает 8 градусов, что позволяет осуществить длительную параллельную работу валогенератора с генераторами судовой электростанции.

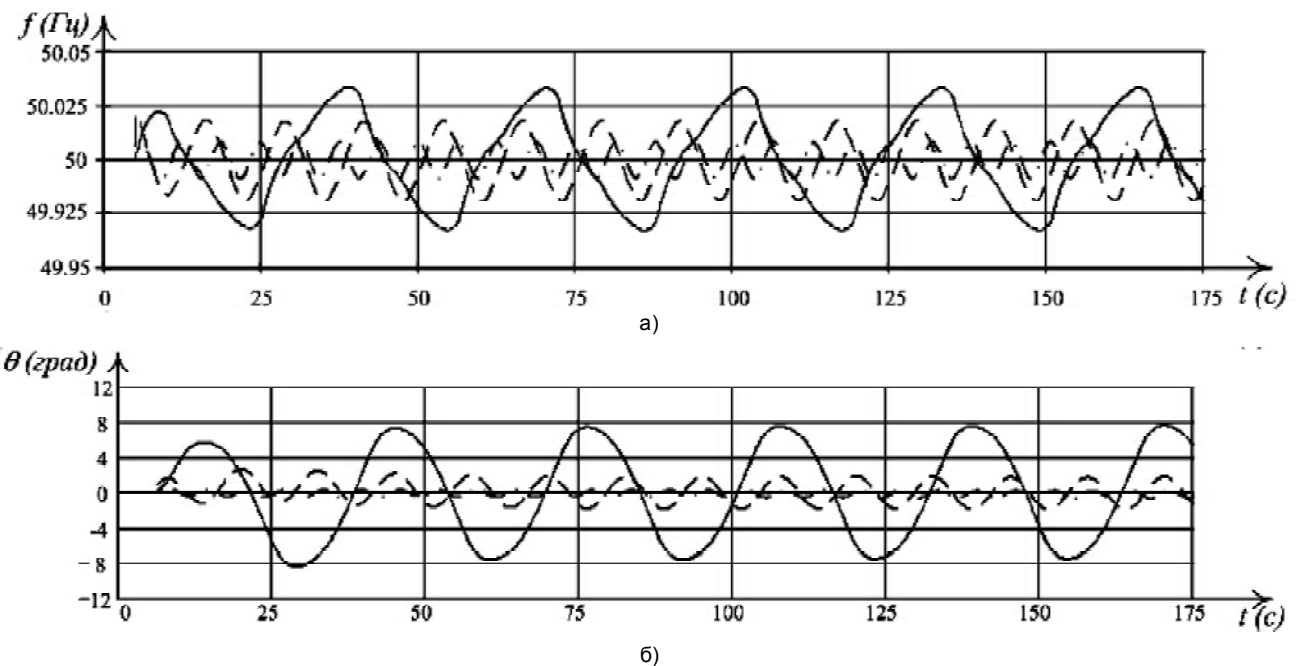


Рис. 2. Переходный процесс изменения частоты (а) и угла нагрузки; (б) валогенератора с использованием регулятора скользящего режима и фаззи-регулятора:

— при  $\Omega = 0,2 \text{ с}^{-1}$ ,  $m_a = -2,7 \text{ о.е.}$ ,  $\gamma_a = 27,25 \text{ о.е.}$ ,  $X_n = 0,6 \text{ о.е.}$ ,  $R_n = 1 \text{ о.е.}$ ,  $I_f = 1,043 \text{ о.е.}$ ,  $K_d = 3 \text{ о.е.}$ ,

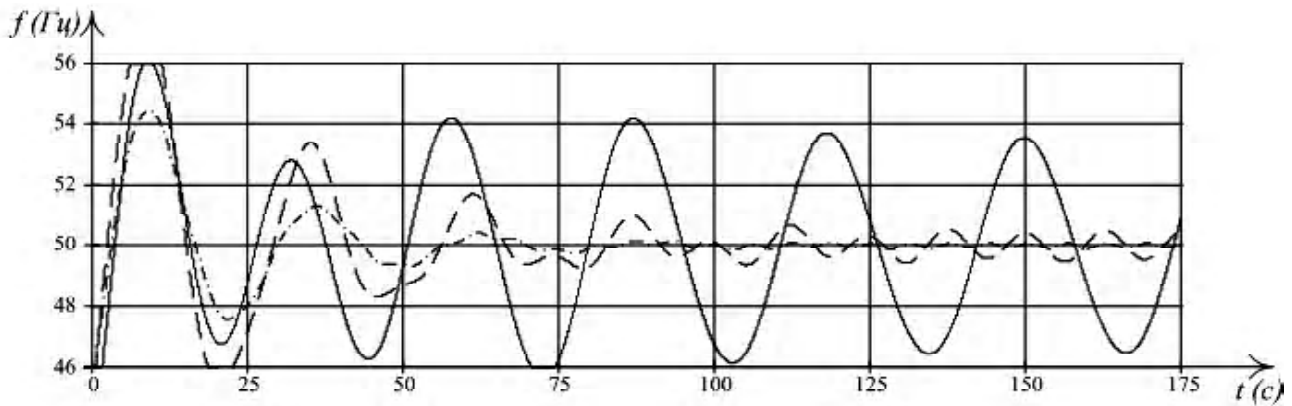
$K_q = 0,8 \text{ о.е.}$ ;

- - - при  $\Omega = 0,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $m_a = -1,5 \text{ о.е.}$ ,  $\gamma_a = 15 \text{ о.е.}$ ,  $X_n = 0,234 \text{ о.е.}$ ,  $R_n = 0,75 \text{ о.е.}$ ,  $I_f = 0,9 \text{ о.е.}$ ,  $K_d = 2 \text{ о.е.}$ ,

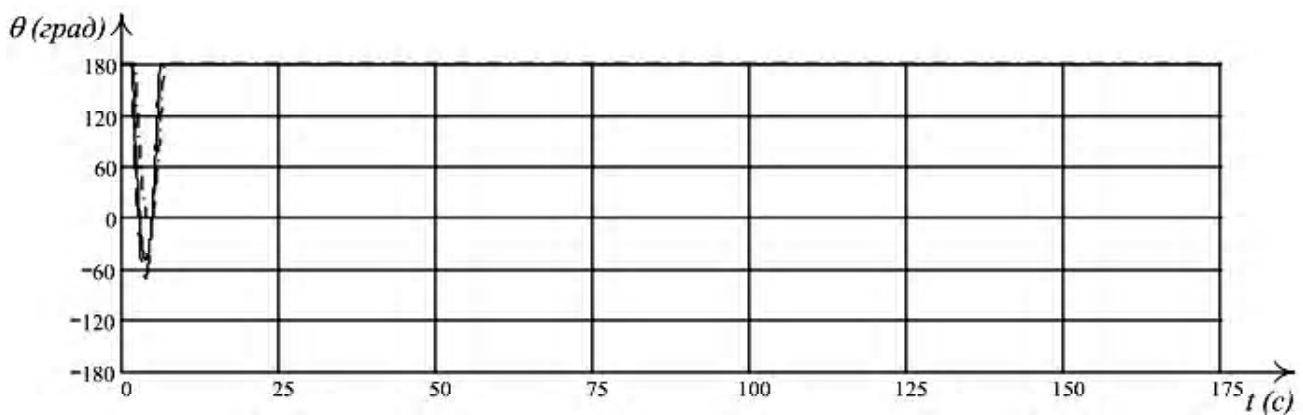
$K_q = 0,8 \text{ о.е.}$ ;

- · - при  $\Omega = 1 \text{ с}^{-1}$ ,  $m_a = -1,08 \text{ о.е.}$ ,  $\gamma_a = 7 \text{ о.е.}$ ,  $X_n = 0,66 \text{ о.е.}$ ,  $R_n = 1,1 \text{ о.е.}$ ,  $I_f = 0,8 \text{ о.е.}$ ,  $K_d = 2,5 \text{ о.е.}$ ,

$K_q = 1,1 \text{ о.е.}$ .



а)



б)

Рис. 3. Переходный процесс изменения частоты (а) и угла нагрузки (б) валогенератора без использования регулятора скользящего режима и фаззи-регулятора:

- при  $\Omega = 0,2 \text{ с}^{-1}$ ,  $m_a = -2,7 \text{ о.е.}$ ,  $\gamma_a = 27,25 \text{ о.е.}$ ,  $X_n = 0,6 \text{ о.е.}$ ,  $R_n = 1 \text{ о.е.}$ ,  $I_f = 1,043 \text{ о.е.}$ ,  $K_d = 3 \text{ о.е.}$   
 $K_q = 0,8 \text{ о.е.}$ ;
- - - при  $\Omega = 0,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $m_a = -1,5 \text{ о.е.}$ ,  $\gamma_a = 15 \text{ о.е.}$ ,  $X_n = 0,234 \text{ о.е.}$ ,  $R_n = 0,75 \text{ о.е.}$ ,  $I_f = 0,9 \text{ о.е.}$ ,  $K_d = 2 \text{ о.е.}$   
 $K_q = 0,8 \text{ о.е.}$ ;
- · - при  $\Omega = 1 \text{ с}^{-1}$ ,  $m_a = -1,08 \text{ о.е.}$ ,  $\gamma_a = 7 \text{ о.е.}$ ,  $X_n = 0,66 \text{ о.е.}$ ,  $R_n = 1,1 \text{ о.е.}$ ,  $I_f = 0,8 \text{ о.е.}$ ,  $K_d = 2,5 \text{ о.е.}$ ,  
 $K_q = 1,1 \text{ о.е.}$

### Вывод

Проведенные исследования свидетельствуют об эффективности применения регулятора скользящего режима совместно с фаззи-регулятором для уменьшения амплитуды колебаний частоты тока и угла нагрузки валогенератора. В частности, в условиях плавания судна и при действии существующих дестабилизирующих факторов, влияющих на характеристики главного двигателя и валогенератора, амплитуда колебаний угла нагрузки не превышает 8 градусов. Благодаря малой амплитуде колебаний угла нагрузки создаются условия для длительной параллельной работы валогенератора и генераторов судовой электростанции.

### Перечень ссылок

1. Теоретические основы эксплуатации судовых дизелей // В. Ю. Гиттис, В. Л. Бондаренко, Т. П. Ефимов и др. – М.: Транспорт, 1965. – 376 с.
2. Колодяжный В. В., Дворак В. Н. Стабилизация динамических и статических характеристик контура регулирования напряжения судового синхронного генератора // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – Вип. 66. – С. 391–393.
3. Шостак В. П., Гершаник В. И. и др. Проектирование пропульсивной установки судов с прямой передачей мощности на винт: Учебное пособие. – Николаев: УГМТУ, 2003. – 500 с.

4. Богомолов В. С. Судовые электроэнергетические установки подчиненного управления. /Ред. С. А. - Горбунова; Калининград: Кн. изд-во. 1996. – 240 с.
5. 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.
6. Болотин Б. И., Вайнер В. Л. Инженерные методы расчетов устойчивости судовых автоматизированных систем. – Л.: Судостроение, 1974. – 332 с.
7. Дворак В. Н. К расчету реакции САУ скользящего режима дизель-генераторного агрегата на внезапное изменение нагрузки и возбуждения // Рыбное хозяйство Украины.– 2006. –№7. – С. 7–8.

Поступила в редакцию 27.10.06 г.

После доработки 28.02.07г.

*В умовах паралельної роботи валогенератора з генераторами судової електростанції шляхом використання регулятора ковзного режиму, що функціонує разом з фази-регулятором, вирішена задача зменшення коливань частоти обертання й кута навантаження валогенератора.*

*The parallel work of shaft-generator with generators of ship power station using the sliding mode regulator that functions together with a fuzzy-regulator, the problem of reduction of rotation frequency fluctuations and of shaft-generator loading corner is solved.*

УДК 621.314.5

В. В. Семенов, Г. Н. Стрункин, С. А. Попов

## Потери мощности в инверторах с однополярной и двуполярной широтно-импульсной модуляцией

*В статье рассмотрена задача расчета мощности динамических потерь в силовых полупроводниковых приборах инверторов с одно- и двуполярной ШИМ. Приведены зависимости полных потерь мощности потерь в ключах от несущей частоты и рабочего напряжения.*

Как известно, серьезным недостатком преобразователей частоты на базе автономных инверторов напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) является снижение их коэффициента полезного действия (КПД) с ростом несущей частоты, связанное с ростом потерь при коммутации силовых приборов. Одно из возможных решений проблемы заключается в применении схем многоуровневых инверторов, позволяющих уменьшить напряжения, прикладываемые к силовым приборам. В этой связи особый интерес вызывает схема трехуровневого АИН [1], позволяющая формировать однофазное напряжение методом однополярной широтно-импульсной модуляции (ОШИМ). Достоинством этой схемы является и то обстоятельство, что к силовым приборам прикладывается напряжение, вдвое меньшее, чем в классической схеме, формирующей двуполярную ШИМ (ДШИМ). Однако, увеличение количества силовых приборов, включенных в контуре тока нагрузки, приводит к росту мощности статических потерь [2]. Вопрос оценки мощности динамических потерь, а также полных потерь в ключах трехуровневого инвертора в современной литературе освещен недостаточно. Данная статья посвящена оценке динамических потерь в силовых приборах однофазных инверторов напряжения с ОШИМ и ДШИМ при жесткой коммутации, а также сравнению полных потерь в этих схемах.

Схемы однофазных инверторов напряжения с ДШИМ и ОШИМ приведены на рис. 1. Работа схем до-

статочно подробно рассмотрена в [1–3]. Будем считать, что устройства формирования траектории переключения приборов (снабберы) не используются, и силовые приборы работают в режиме так называемой «жесткой» коммутации. Такой режим происходит, например, в преобразователях небольшой мощности при использовании интеллектуальных модулей на основе IGBT, в которых подключение снабберов затруднено.

Для оценки коммутационных потерь в транзисторах инвертора рассмотрим более детально процессы при их включении и выключении. Предположим, что при включении транзистора ток коллектора нарастает по линейному закону [4]:

$$I_m(t) = I_m \frac{t}{t_{\text{вкл}}}, \quad (1)$$

где  $I_m$  – ток, протекающий через транзистор,  $t_{\text{вкл}}$  – время включения транзистора.

При жесткой коммутации, как показано на рис. 2, а, напряжение между коллектором и эмиттером транзистора при нарастании коллекторного тока остается постоянным и мгновенно спадает лишь после того, как происходит восстановление сопротивления обратного диода. С учетом этого процессы при включении можно разбить на два интервала. На первом (от нуля до  $t_{\text{вкл}}$ ) протекает линейно изменяющийся ток при пол-