

УДК 681.532.8

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОДДЕРЖАНИЯ КУРСА КОРАБЛЯ НА ОСНОВЕ РУЛЕВОГО ПРИВОДА С ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

И.Е. Овчинников, Н.Г. Ватунская

Рассматривается нелинейная задача динамики управления курсом корабля с вентильным двигателем в приводе рулевой машины. Синтезируется закон управления, выбираются коэффициенты усиления и передаточное отношение редуктора.

Ключевые слова: вентильный двигатель, привод рулевой машины, закон управления, коэффициенты усиления, передаточное отношение редуктора.

Введение

Применение вентильных двигателей в приводах рулевых механизмов судов разных типов представляется перспективным с точки зрения известных преимуществ этого класса электрических машин, таких как отсутствие необходимости обслуживания, высокий длительный момент на единицу массы двигателя, высокий к.п.д. Все эти факторы достаточно важны для автономных транспортных объектов, какими и являются морские и речные суда.

Вентильные двигатели, несмотря на общность свойств и характеристик с двигателями постоянного тока, обладают специфическими отличиями, связанными с нелинейностью механических характеристик [1]. В этой связи поставлена задача изучения некоторых динамических процессов, возникающих в замкнутой системе управления курсом корабля с помощью рулевой машины, приводимой в движение вентильным двигателем.

Вывод динамики управления курсом корабля

На рис. 1 показан контур корабля C в плане, причем продольная ось X и связанный с ней вектор скорости корабля \vec{V} отклонены от заданного направления на угол $\Delta\Psi$. Начальное значение отклонения равно Ψ_0 и соответствует положению продольной оси OX_0 . Текущее изменение угла Ψ и ошибка отработки угла связаны зависимостью $\Delta\Psi = \Psi_0 - \Psi$. Изменение курсового угла Ψ и отработка рассогласования $\Delta\Psi$

осуществляются поворотом лопасти руля *РП* на угол δ относительно продольной оси OX , а поворот руля – через редуктор управляемым вентильным двигателем.

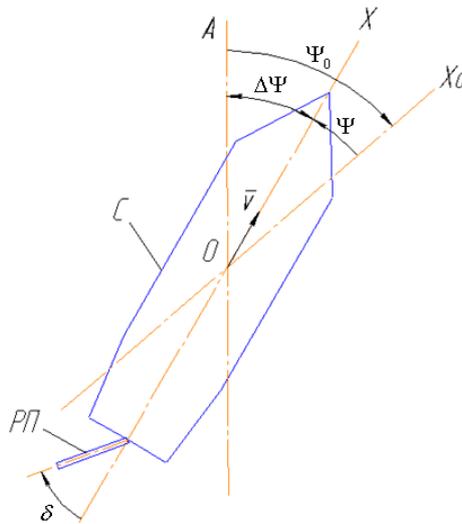


Рис. 1. Контур корабля и его угловые координаты

Структурная схема системы управления курсом корабля показана на рис. 2, где *И* – управляемый полупроводниковый инвертор (коммутатор), питающий вентильный двигатель *Д*; $f(\vartheta)$ – импульсная функция, распределяющая импульсы управления с датчика положения ротора (на схеме не показан) на соответствующие ключи инвертора *И*; ϑ – угол поворота ротора; *P* – редуктор с передаточным отношением i ; δ – угол поворота (закладки) руля; *РП* – рулевая поверхность руля; *Г* – блок гироскопов (курсового, вырабатывающего сигнал, пропорциональный Ψ и $\Delta\Psi$, и демпфирующего, вырабатывающего сигнал, пропорциональный производной $\dot{\Psi}$); k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты усиления соответствующих сигналов; U – напряжение питания инвертора; U_y – сигнал управления инвертором; M_{c1} – момент сопротивления повороту корпуса судна при изменении курса; M_{c2} – момент сопротивления повороту рулевой поверхности в гидравлической среде; $M_{p\Sigma}$ – суммарный момент руля, передаваемый на корпус корабля *С*.

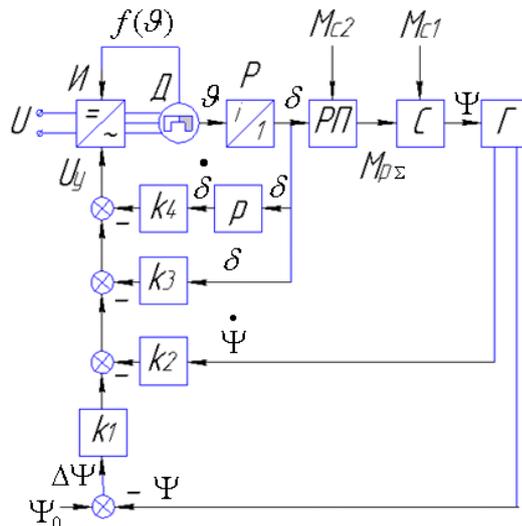


Рис. 2. Структурная схема системы управления курсом корабля

Прежде всего определим моменты, действующие на корпус корабля и руль. Опуская вывод формул моментов, действующих на корабль и на руль и обусловленных движением в воде, приведем лишь конечный результат.

Момент сопротивления повороту корпуса судна в воде равен

$$M_{C1} = \frac{1}{64} c \gamma \omega_k^2 L_e^4 H \operatorname{sign} \omega_k = \frac{1}{64} c \gamma \omega_k^2 L_e^4 H \left| \frac{d\Psi}{dt} \right|, \text{ Нм},$$

где c – коэффициент гидравлического сопротивления, который может быть принят равным [2] $c \approx 1,11$; γ – плотность воды, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\omega_k = \frac{d\Psi}{dt}$ – угловая скорость поворота корпуса корабля; L_e, H – эквивалентная длина и высота части корпуса, погруженной в воду, м. Момент сопротивления повороту рулевой поверхности в воде равен

$$M_{C2} = \frac{1}{8} c \gamma \omega_p^2 S_2 R^3 \operatorname{sign} \omega_p = \frac{1}{8} c \gamma \omega_p^2 S_2 R^3 \left| \frac{d\delta}{dt} \right|, \text{ Нм},$$

где $\omega_p = \frac{d\delta}{dt}$ – угловая скорость поворота руля, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$; S_2, R – площадь рулевой поверхности и максимальный вылет (радиус) руля, м. Рабочий момент руля при отклонении на угол δ равен

$$M_p = \frac{1}{4} c \gamma V^2 S_2 R \sin \delta, \text{ Нм},$$

где V – линейная скорость корабля, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$. Моменты M_{C1} и M_{C2} должны изменять знак при изменении знака скорости. С учетом записей выражений для моментов имеем:

$$\begin{aligned} M_{C1} &= C_1 \cdot \frac{d\Psi}{dt} \cdot \left| \frac{d\Psi}{dt} \right|, \\ M_{C2} &= C_2 \cdot \frac{d\delta}{dt} \cdot \left| \frac{d\delta}{dt} \right|, \\ M_p &= C_p \cdot \sin \delta, \end{aligned} \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{1}{64} c \gamma L_e^4 H, \quad C_2 = \frac{1}{8} c \gamma S_2 R^3, \quad C_p = \frac{1}{4} c \gamma S_2 R V^2.$$

Суммарный момент, действующий на руль, равен

$$M_{p\Sigma} = M_p + M_{C2}. \quad (2)$$

Теперь приступим к написанию уравнений динамики. Уравнение поворота корпуса судна относительно оси Z , проходящей через точку O и перпендикулярной плоскости рис. 1,

$$J_Z \frac{d^2\Psi}{dt^2} = M_{p\Sigma} - M_{C1}, \quad (3)$$

где J_Z – момент инерции корабля относительно оси Z . Уравнение движения вала двигателя

$$J_M \frac{d^2\vartheta}{dt^2} = M_D - k_p \cdot M_p', \quad (4)$$

где J_M – момент инерции, приведенный к валу двигателя; M_D – электромагнитный момент двигателя; k_p – коэффициент, учитывающий потери в редукторе (далее принимается $k_p = 1$); $M_p' = \frac{M_{p\Sigma}}{i}$ – момент на руле, приведенный к валу двигателя; i – переда-

точное отношение редуктора. Далее уравнение (4) удобно привести к валу редуктора, имея соотношение $\vartheta = i \cdot \delta$:

$$J_M i^2 \frac{d\delta}{dt} = iM_D - M_{p\Sigma}. \quad (5)$$

Момент, создаваемый двигателем, учитывая инерционность системы, обусловленную большим моментом инерции корпуса корабля, примем в виде [1]

$$M_D = \frac{3\sqrt{3}}{2 \cdot \pi} p w_{1e} \Phi \cdot \frac{\left(U_y - \frac{3\sqrt{3}}{\pi} p w_{1e} \Phi \Omega \right) \cdot R_1}{R_1^2 + 0,3 \left(\frac{3}{2} L_1 \Omega \right)^2} = \frac{C_M}{R_1} \cdot \frac{\left(U_y - C_M i \frac{d\delta}{dt} \right) R_1}{1 + 0,3 \left(T_e i \frac{d\delta}{dt} \right)^2}, \quad (6)$$

где p, w_{1e}, Φ – число пар полюсов, эффективное число витков фазы и поток на пару полюсов соответственно; R_1, L_1 – активное сопротивление и индуктивность фазы; Ω – угловая скорость ротора, выражаемая через угловую скорость закладки руля, $\Omega = i \frac{d\delta}{dt}$;

U_y – управляемое напряжение в звене постоянного тока (или напряжение, подаваемое на двигатель); $\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} p w_{1e} \Phi = C_M$; $\frac{3}{2} \frac{L_1}{R_1} = T_e$.

На основании исследования аналогичной линеаризованной системы было установлено, что формирование управляющего напряжения U_y , содержащего только сигналы от курсового и демпфирующего гироскопов вида $U_y = k_1 \cdot \Delta\Psi - k_2 \cdot \Delta\dot{\Psi} = k_1 \cdot \Psi_0 - k_1 \cdot \Psi - k_1 \cdot \dot{\Psi}$, не обеспечивает необходимого качества переходного процесса. Процесс затухает медленно и сопровождается большой колебательностью. В связи с этим был принят закон регулирования, применяемый в автопилотах курса самолета [3],

$$U_y = k_1 \cdot \Delta\Psi - k_2 \cdot \dot{\Psi} - k_3 \cdot \delta - k_4 \cdot \dot{\delta}. \quad (7)$$

В итоге система уравнений динамики, включающая изменение курса корабля Ψ , поворота руля δ и напряжение на коммутаторе (двигателе) U_y , записанная с учетом того, что отклонение курса $\Delta\Psi = \Psi_0 - \Psi$, $\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d\Delta\Psi}{dt}$, принимает вид (уравнения (3), (5), (6), (7)):

$$J_Z \frac{d^2 \Delta\Psi}{dt^2} + C_1 \frac{d\Delta\Psi}{dt} \cdot \left| \frac{d\Delta\Psi}{dt} \right| = -C_p \sin \delta - C_2 \frac{d\delta}{dt} \left| \frac{d\delta}{dt} \right|,$$

$$J_M i^2 \frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{i^2 C_M^2}{R_1 \left[1 + 0,3 \left(T_e i \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right]} \frac{d\delta}{dt} + C_2 \frac{d\delta}{dt} \left| \frac{d\delta}{dt} \right| + C_p \sin \delta = \frac{i C_M U_y}{R_1 \left[1 + 0,3 \left(T_e i \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right]}, \quad (8)$$

$$U_y = k_1 \cdot \Delta\Psi + k_2 \cdot \Delta\dot{\Psi} - k_3 \delta - k_4 \cdot \dot{\delta}.$$

Мы получили систему существенно нелинейных дифференциальных уравнений, к которой не применим в полной мере аппарат анализа и синтеза, широко развитый для линейных систем автоматического регулирования, в том числе электропривода. Приведем систему уравнений (8) к безразмерной форме, введя безразмерные величины: на-

пряжение управления $u = \frac{U_y}{(U_y)_{\max}}$, $-1 \leq u \leq 1$, момент $\mu = \frac{M}{M_\sigma}$, $M_\sigma = \frac{\sqrt{3}}{2} p w_{1e} \Phi \frac{(U_y)_{\max}}{R_1}$.

Поделив первое и второе уравнение системы (8) на базовый момент M_σ , а третье – на базовое напряжение $(U_y)_{\max}$, получим систему уравнений в виде

$$\frac{J_z}{M_\sigma} \cdot \frac{d^2 \Delta \Psi}{dt^2} + \mu_{C1} \frac{d\Delta \Psi}{dt} \left| \frac{d\Delta \Psi}{dt} \right| = -\mu_p \sin \delta - \mu_{C2} \frac{d\delta}{dt} \left| \frac{d\delta}{dt} \right|,$$

$$\frac{J'_p}{M_\sigma} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{9}{\pi^2} \cdot \frac{i^2}{\Omega_\sigma \left[1 + 0,3i^2 T_e^2 \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right]} \frac{d\delta}{dt} + \mu_{C2} \frac{d\delta}{dt} \left| \frac{d\delta}{dt} \right| + \mu_p \sin \delta = \frac{3}{\pi} \frac{i u}{\Omega_\sigma \left[1 + 0,3i^2 T_e^2 \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right]}, \quad (9)$$

$$u = k'_1 \cdot \Delta \Psi + k'_2 \frac{d\Delta \Psi}{dt} - k'_3 \delta - k'_4 \frac{d\delta}{dt}.$$

Здесь $\Omega_\sigma = \frac{(U_y)_{\max}}{\sqrt{3} p w_{1e} \Phi}$, $\mu_{C1} = \frac{C_1}{M_\sigma}$, $\mu_{C2} = \frac{C_2}{M_\sigma}$, $\mu_p = \frac{C_p}{M_\sigma}$, $J'_p = J_p + J_0 \cdot i^2$ – момент инерции руля с учетом момента инерции ротора J_0 .

Моделирование системы

Исходные данные, принятые при моделировании системы нелинейных дифференциальных уравнений (9), следующие: $L = 11$ м, $H = 2,6$ м, $S = 0,96$ м², $J_z = 2 \cdot 10^5$ кг·м², $J_p = 7,7$ кг·м², $M_\sigma = 160$ Нм, $(U_y)_{\max} = 100$ В, $\Omega_\sigma = 300$ 1/с, $T_e = 2,5 \cdot 10^{-3}$ с, $V = 5$ М/с и

$V = 10$ М/с, $\mu_{C1} = \frac{7 \cdot 10^5}{M_\sigma} \text{ с}^2$, $\mu_{C2} = \frac{30}{M_\sigma} \text{ с}^2$, $\mu_p = \frac{80 \cdot V^2}{M_\sigma}$. Выбору подлежат передаточное

отношение редуктора i и коэффициенты усиления k'_1, k'_2, k'_3, k'_4 . Анализ линеаризованной системы (9), «усеченной» до 3-го порядка, позволил по диаграмме Вышнеградского [3] выбрать коэффициенты k'_1 и k'_2 , а затем подобрать коэффициенты k'_3 и k'_4 , обеспечивающие слабоколебательный, достаточно быстро затухающий процесс с учетом большой инерционности системы, обусловленный моментом инерции корпуса корабля J_z . Таким образом, было принято $k'_1 = 1,5$, $k'_2 = 13,68$, $k'_3 = 0,31$, $k'_4 = 2,42$.

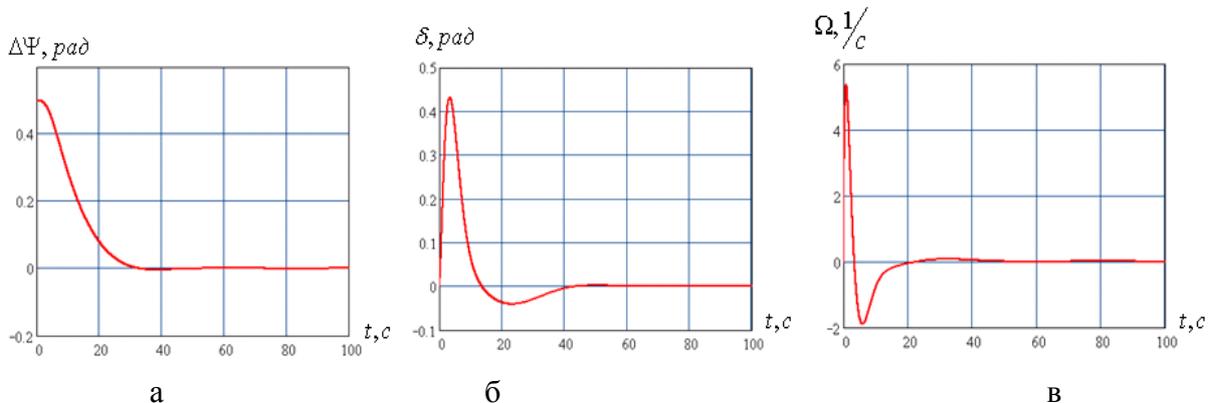


Рис. 3. Переходные процессы при передаточном отношении редуктора $i = 25$:
а) угол рассогласования курса, б) угол закладки руля,
в) угловая скорость ротора двигателя

На рис. 3 изображены результаты моделирования системы уравнений (9) в виде графиков переходных процессов для угла рассогласования курса $\Delta\Psi$ (а), угла закладки руля δ (б) и скорости ротора двигателя (в). Можно видеть, что при начальном рассогласовании $\Delta\Psi_0 = 0,5$ рад процесс заканчивается достаточно быстро, за 40–50 с, является плавным для угла курса $\Delta\Psi$ и слабо колебательным для угла закладки руля δ . Передаточное отношение редуктора в данном случае соответствует величине $i = 25$.

При уменьшении передаточного отношения до $i = 10$ (рис. 4) плавность переходного процесса сохранилась практически прежней, однако время отработки рассогласования $\Delta\Psi_0$ увеличилось и составило теоретически 80–100 с, хотя с практической точки зрения (малые углы ошибки $\Delta\Psi$) его вполне можно оценить как 60–70 с (рис. 4, а).

Моделирование показало вполне удачный выбор коэффициентов усиления сигналов, формирующих управляющее напряжение U_y , а также нецелесообразность уменьшения передаточного отношения редуктора ниже $i = 10$.

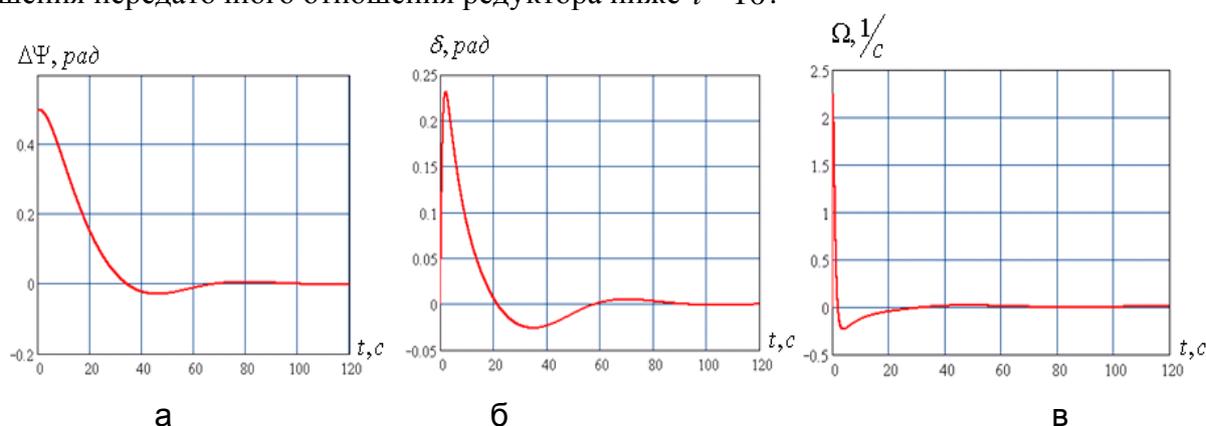


Рис. 4. Переходные процессы при передаточном отношении редуктора $i = 10$: а) угол рассогласования курса, б) угол закладки руля, в) угловая скорость ротора двигателя

Изменение угловой скорости ротора двигателя Ω , представленное на рис. 3, 4, в, показывает, что максимум скорости в переходном процессе весьма невелик по отношению к скорости холостого хода ($\Omega_{0,xx} = \Omega_0 = 300 \text{ с}^{-1}$) и составляет всего лишь 6 с^{-1} (рис. 3, в) и $2,5 \text{ с}^{-1}$ (рис. 4, в). Это говорит о том, что двигатель работает практически в режиме моментного двигателя, и для данной задачи более целесообразным оказался бы низкооборотный двигатель с равным или большим пусковым (стопорным) моментом.

Заключение

1. Применение вентильного двигателя в приводе рулевой машины позволяет обеспечить отработку угла рассогласования курса при хорошем качестве и ограниченной длительности переходного процесса. При этом управляющий сигнал содержит четыре составляющих (две – по отклонению курса и отклонению руля и две – по производным от этих отклонений).
2. Для заданного сочетания исходных данных и параметров возможное передаточное отношение редуктора должно быть оценено величиной $i = 10\text{--}25$. Увеличение i приведет к возрастанию стоимости и массы редуктора, а снижение – к увеличению длительности переходного процесса.
3. Для решения рассматриваемой задачи целесообразным является применение низкооборотного вентильного двигателя.

Литература

1. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. — СПб: Корона-Век, 2006.
2. Кухлинг Х. Справочник по физике. — М.: Мир, 1982.
3. Попов Е.П. Динамика систем автоматического регулирования. — М.: ИТТЛ, 1954.

- Овчинников Игорь Евгеньевич* — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ludimit@yandex.ru
- Ватунская Наталья Геннадьевна* — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Tawechka@yandex.ru