

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННОГО ПРИВОДА СУДОВОЙ БУКСИРНОЙ ЛЕБЕДКИ

Канд. техн. наук, доц. МЕХДИЕВ Г. А., инж. СУЛТАНОВ Э. Ф.

Азербайджанская государственная морская академия

При буксировке судов усилия в буксирном канате зависят от условий движения, состояния поверхности моря и ряда других факторов. Даже в спокойную погоду изменение скорости буксировки, выполнение маневров буксирующим судном приводят к возникновению дополнительных усилий в канате, имеющих колебательный характер.

Суда, предназначенные для буксировочных операций (морские буксиры, спасатели, ледоколы), как правило, снабжаются специальными буксирными лебедками с электроприводом. Такие лебедки обеспечивают хранение на рабочем барабане всего запаса буксирного каната, ручное и автоматическое регулирование длины буксирного каната и при изменении условий плавания позволяют оптимизировать режим буксировки. Одной из основных задач лебедки в автоматическом режиме является поддержание постоянного натяжения в канате, так как резкие ударные нагрузки могут привести к его обрыву, а в условиях маневрирования – даже к опрокидыванию буксира. Значительная слабина каната не исключает возможность его наматывания на винт буксира [1].

Применяемые в судовых буксирных устройствах многоскоростные асинхронные электроприводы имеют следующие недостатки: регулирование скорости вращения является ступенчатым, система управления электроприводом – контакторная, измерение тягового усилия в буксирном канате осуществляется механическим (пружинного типа) устройством.

Названные выше недостатки показывают, что такой автоматизированный электропривод не в состоянии обеспечивать оптимальный режим работы буксирной лебедки. Поэтому он менее надежен, чем бесконтактные плавно регулируемые асинхронные электроприводы. На основании вышеизложенного в работах [2, 3] указано на возможность и целесообразность применения векторно-управляемого асинхронного двигателя (АД) в судовых буксирных лебедках.

Векторное управление АД, в котором выходными сигналами являются потокосцепление и частота ротора [2, 4], – простой и распространенный на практике метод. В соответствии с выражением, приведенным в [2], момент – это функция потокосцепления и частоты тока ротора (ω_2)

$$M = \frac{3Z_p \Psi_{2d}^2}{2r_2} \omega_2, \quad (1)$$

где Z_p – число пар полюсов машины.

Уравнение движения электропривода в переходном режиме записывается в виде

$$M = J \frac{d\omega}{dt} = JP\omega. \quad (2)$$

Подставив (1) в (2), получим

$$\frac{3Z_p \Psi_{2d}^2}{2r_2} \omega_2 = JP\omega. \quad (3)$$

Передаточная функция АД по каналу управления частотой ротора будет определяться по формуле

$$\frac{\omega(P)}{\omega_2(P)} = \frac{3Z_p \Psi_{2d}^2}{JP2r_2} = \frac{1}{PT_m}, \quad (4)$$

где $T_m = \frac{2Jr_2}{3Z_p \Psi_{2d}^2}$ – механическая постоянная времени.

Передаточная функция канала управления частотой ротора (4) соответствует интегрирующему звену, что позволяет представить его структурную схему в замкнутой системе управления, как показано на рис. 1

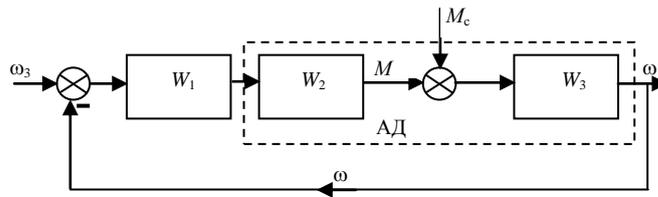


Рис. 1. Структурная схема системы управления при постоянном потокосцеплении ротора: W_1 – передаточная функция регулятора скорости; W_2, W_3 – передаточные функции АД

Принимая регулятор скорости безынерционным, получим

$$W_1(P) = K. \quad (5)$$

Передаточные функции АД соответственно будут определяться по формулам:

$$W_2(P) = \frac{3Z_p \Psi_{2d}^2}{2r_2}; \quad (6)$$

$$W_3(P) = \frac{1}{PJ}. \quad (7)$$

I. Передаточную функцию по управляющему воздействию записывают в виде

$$W_y(P) = \frac{W_1(P)W_2(P)W_3(P)}{1 + W_1(P)W_2(P)W_3(P)}. \quad (8)$$

После соответствующего преобразования получим

$$W_y(P) = \frac{K3Z_p\Psi_{2d}^2}{2r_2PJ + K3Z_p\Psi_{2d}^2} = \frac{K}{\frac{2r_2J}{3Z_p\Psi_{2d}^2}P + K}. \quad (9)$$

Обозначим механическую постоянную времени $T_m = \frac{2Jr_2}{3Z_p\Psi_{2d}^2}$. В окончательном виде получим выражение

$$W_y(P) = \frac{K}{T_m P + K}. \quad (10)$$

II. Передаточная функция по возмущающему воздействию. Структурная схема системы при возмущающем воздействии приведена на рис. 2.

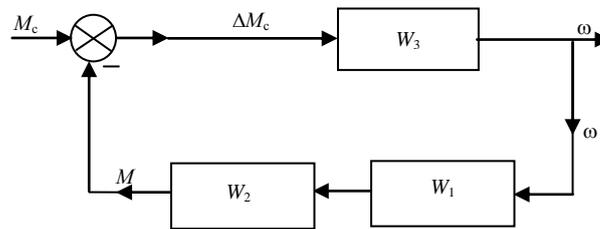


Рис. 2. Структурная схема системы при возмущающем воздействии

Уравнение определения передаточной функции по возмущающему воздействию запишем в виде

$$W_B(P) = \frac{W_3(P)}{1 + W_1(P)W_2(P)W_3(P)} = \frac{\frac{1}{JP}}{1 + K \frac{3Z_p\Psi_{2d}^2}{2r_2} \cdot \frac{1}{JP}}. \quad (11)$$

После соответствующих преобразований получим:

$$W_B(P) = \frac{2r_2}{2r_2JP + K3Z_p\Psi_{2d}^2}; \quad (12)$$

$$W_B(P) = \frac{D}{T_m P + K}, \quad (13)$$

где $D = \frac{2r_2}{3Z_p\Psi_{2d}^2}$.

III. Переходные характеристики системы при управляющих и возмущающих воздействиях. Для определения значения постоянной времени T_m воспользуемся параметрами реальной судовой буксирной лебедки: номинальное усилие F_n , создаваемое буксиром на барабане лебедки, находится в пределах $F_n = 180-270$ кН; диаметр стального троса $D = 48,5$ мм; скорость выбирания троса $v = 0,25-0,50$ м/с; тип электродвигателя – МАР 721-4/12; $P_n = 50/50$ кВт; $n_n = 1410/430$ об/мин; $J = 1,11$ кг·м².

Номинальный момент двигателя определяется по формуле

$$M_H = 9555 \frac{P_H}{n_H} = 9555 \frac{50}{1410} = 338,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Номинальное скольжение двигателя

$$S_H = \frac{n_o - n_H}{n_o} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0,06.$$

Момент инерции вращающихся частей, приведенный к валу двигателя:

$$J_{\text{пр.вр}} = J_{\text{эл.дв}} (1,1 - 1,3) = 1,3 \cdot 1,11 = 1,44 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Приведение поступательно движущегося груза (буксируемого судна) к валу двигателя осуществляется по формуле

$$J_{\text{пр.гр}} = \frac{F_H v_H^2}{\omega_H^2}, \quad (14)$$

где F_H – сила сопротивления, создаваемого буксиром на барабане лебедки, равная $F_H = 180\text{--}270$ кН, принимаем $F_H = 250$ кН; $v_H = 0,4$ м/с – номинальная скорость выгибания буксирного каната.

С помощью выражения (14) определяем

$$J_{\text{пр.гр}} = \frac{F_H v_H^2}{\omega_H^2} = \frac{250000 \cdot 0,4^2}{147,58^2} = 1,84 \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

$$\text{где } \omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 1410}{30} = 147,58 \text{ рад/с}.$$

Приведенный на вал двигателя общий момент инерции определим по формуле

$$J_{\text{пр.об}} = J_{\text{пр.вр}} + J_{\text{пр.гр}} = 1,44 + 1,84 = 3,28 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

В пределах прямолинейной части характеристики АД для механической постоянной времени справедливо выражение [5]

$$T_m = J \frac{\omega_c}{M_H} S_H, \quad (15)$$

$$\text{где } \omega_c = \frac{\pi n_c}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с}.$$

Определяем T_m электропривода данной буксирной лебедки из выражения

$$T_m = J \frac{\omega_c}{M_H} S_H = 3,28 \cdot \frac{157}{338,8} \cdot 0,06 = 0,091 \text{ с}.$$

Переходная характеристика системы при ступенчатом управляющем воздействии (рис. 3) строится решением характеристического уравнения передаточной функции (10)

$$T_m P + K = 0, \quad (16)$$

где $P = -\frac{1}{T_m}$, при этом решение характеристического уравнения имеет вид

$$X_{\text{ВЫХ}} = KX_{\text{ВХ}} \left(1 - e^{-\frac{t}{P}} \right). \quad (17)$$

Так как в данном случае (рис. 1): $X_{\text{ВЫХ}} = \omega$; $X_{\text{ВХ}} = \omega_3$ и при начальных условиях: $t=0$; $\omega=0$; $\omega_3=1$, приняв $k=1$, в относительных единицах получим

$$\omega = 1 - e^{-\frac{t}{0,091}}. \quad (18)$$

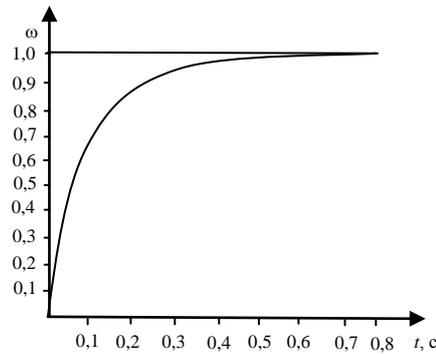


Рис. 3. Переходная характеристика системы при ступенчатом управляющем воздействии

Результаты вычислений приведены в табл. 1.

Таблица 1

| | | | | | | | | | |
|------------------------|---|------|------|------|-------|------|-------|--------|--------|
| t, c | 0 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,080 | 0,10 | 0,300 | 0,5000 | 0,8000 |
| $\frac{t}{0,091}$ | 0 | 0,22 | 0,44 | 0,66 | 0,880 | 1,10 | 3,290 | 5,5000 | 5,4300 |
| $e^{-\frac{t}{0,091}}$ | 1 | 0,80 | 0,64 | 0,55 | 0,414 | 0,33 | 0,037 | 0,0041 | 0,0015 |
| ω | 0 | 0,20 | 0,36 | 0,45 | 0,590 | 0,67 | 0,960 | 0,9900 | 0,9980 |

Переходная характеристика системы при ступенчатом возмущающем воздействии (рис. 4) строится решением характеристического уравнения передаточной функции (13)

$$T_m P + K = 0. \quad (19)$$

Следует отметить, что в данном случае электропривод переходит от одного установившегося состояния к другому, т. е. при $t = 0$ величина

$\omega = \omega_{1уст} = \omega_n$; при $t = \infty$ $\omega = \omega_{2уст}$. При таких начальных условиях (приняв $k = 1$) решение уравнения (19) в относительных единицах будет записываться следующим образом:

$$\omega = \omega_{2уст} + (\omega_n - \omega_{2уст}) e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (20)$$

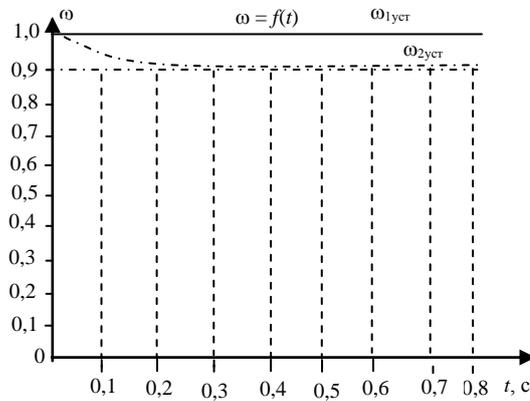


Рис. 4. Переходная характеристика системы при ступенчатом возмущающем воздействии

При увеличении момента сопротивления в два раза, что может быть в случае кратковременного порыва ветра, скорость данного двигателя снизится приблизительно на 10 % (это объясняется наклоном естественной механической характеристики). Тогда в относительных единицах уравнение (20) примет вид

$$\omega = 0,9 + (1 - 0,9) e^{-\frac{t}{0,091}}. \quad (21)$$

Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

| | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----|------|-------|------|------|------|-------|--------|---------|
| t, c | 0 | 0,02 | 0,040 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,300 | 0,5000 | 0,8000 |
| $\frac{t}{0,091}$ | 0 | 0,22 | 0,440 | 0,66 | 0,88 | 1,10 | 3,290 | 5,5000 | 8,8000 |
| $e^{-\frac{t}{0,091}}$ | 1,0 | 0,80 | 0,640 | 0,55 | 0,41 | 0,33 | 0,880 | 0,0041 | 0,0015 |
| $(1 - 0,9) e^{-\frac{t}{0,091}}$ | 0,1 | 0,08 | 0,064 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,004 | 0,0004 | 0,00015 |
| ω | 1,0 | 0,98 | 0,964 | 0,95 | 0,94 | 0,93 | 0,904 | 0,9004 | 0,90015 |

Как видно из рис. 3 и 4, длительность переходного процесса данной системы незначительная, что является важным фактором для электроприводов буксирной лебедки.

ВЫВОДЫ

В результате построения и исследования замкнутой системы векторного управления асинхронного электропривода выявлено, что длительность переходного процесса данной системы незначительная. Это важно для предотвращения аварийных случаев (например, при набросе нагрузки) при буксировке судов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б а б а е в, А. М. Автоматизированные судовые электроприводы / А. М. Бабаев, В. Я. Ягодкин. – М.: Транспорт, 1986.
2. Б а г и р о в, С. М. Разработка системы автоматического управления электроприводом буксирной лебедки / С. М. Багиров, Е. Ф. Султанов // Научные труды Азербайджанской государственной морской академии. – Баку: Ти-Медиа, 2009 (на азербайджанском языке). – № 8.
3. М е х д и е в, Г. А. Анализ структурных схем векторно-управляемого асинхронного привода буксирной лебедки / Г. А. Мехдиев, Е. Ф. Султанов // Научные труды Азербайджанской государственной морской академии. – Баку: Ти-Медиа, 2010 (на азербайджанском языке). – № 1.
4. Р у д а к о в, В. В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В. В. Рудаков, И. М. Столяров, В. А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Ч е к у н о в, К. А. Теория судового электропривода / К. А. Чекунов. – Л.: Судостроение, 1982.

Представлена кафедрой
электрооборудования судов

Поступила 11.04.2011