УДК 62-55:681.515

В.И. Кащук

Государственный университет телекоммуникаций, Киев

АНАЛИЗ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И РОБАСТНОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ПЕРЕДАТЧИКА С ДВОЙНЫМ ФАЗООПЕРЕЖАЮЩИМ КОНТУРОМ

В данной работе методом математического моделирования в интерактивной системе MATLAB определяются относительная устойчивость и робастность системы автоматического регулирования мощности излучения передатчика с аналоговым корректирующим контуром в адаптивном радиоканале связи и приведен анализ относительной устойчивости и робастности этой системы с точки зрения теории автоматического управления. Показано, что применение этого корректирующего контура в системе автоматического регулирования мощности излучения передатчика, является целесообразным и перспективным.

Ключевые слова: *автоматическое регулирование мощности излучения передатчика, относительная устойчивость, робастность.*

Введение

Системы автоматического регулирования мощности передатчика (системы АРМП) в адаптивных каналах радиосвязи с точки зрения теории автоматического управления представляют собой замкнутые системы управления с обратной связью.

При анализе и синтезе систем управления с обратной связью первоочередное значение имеет их устойчивость. Устойчивую систему определяют как систему, которая имеет ограниченную реакцию при влиянии ограниченного входного сигнала или сигнала возбуждения. Если замкнутая система устойчивая, то для качественной работы системы необходимо определять относительную устойчивость, которая характеризуется запасом устойчивости по модулю, запасом устойчивости по фазе и частотной полосой пропускания [1]. Необходимость определенных запасов устойчивости обусловлена тем, что уравнения элементов системы, как правило, идеализированные, параметры элементов определяются с некоторой погрешностью и имеют технологический разброс, при эксплуатации параметры некоторых элементов изменяются вследствие старения. Относительную устойчивость, наравне с другими показателями, например, показателями точности и быстродействия, можно отнести к основным показателям качества системы.

Для анализа относительной устойчивости целесообразно использовать частотные характеристики системы, которые можно получить экспериментально путем подачи на вход системы синусоидального воздействия и варьирования его частоты. Это дает возможность исследовать относительную устойчивость системы даже тогда, когда значения параметров системы неизвестные. Частотный критерий устойчивости также может подсказать, как следует изменить параметры системы, чтобы повысить ее относительную устойчивость.

Соответственно частотному критерию Найквиста для определения устойчивости замкнутой системы необходимо исследовать ее характеристическое уравнение: $F(s) = 1 + G(s)$, где $G(s)$ – передающая функция разомкнутой системы с единичной обратной связью.

При использовании логарифмических амплитудно-частотных характеристик запас по модулю определяется как величина, обратная модулю функции $G(j\omega)$ на частоте, при которой фазовый сдвиг равняется -180^0 либо для неминимально-фазовых систем $+180^0$, и показывает во сколько раз можно увеличить коэффициент усиления системы, прежде чем она окажется на границе устойчивости. Запас по фазе – величина, которая определяется на частоте, при которой $|G(j\omega)| = 1$, и показывает, какой дополнительный отрицательный фазовый сдвиг допустим в системе, прежде чем она окажется на границе устойчивости. Полоса пропускания определяется частотой, на которой коэффициент усиления принимает значение -3 дБ.

Критерий Найквиста имеет то преимущество, что очень просто учесть влияние запаздывания, которое характеризуется функцией $e^{-\tau s}$, на устойчивость системы, поскольку множитель $e^{-j\omega\tau}$ приводит к дополнительному сдвигу фазовой характеристики на угол $\varphi_1(\omega) = -\omega\tau$.

Относительную устойчивость и робастность систем АРМП с аналоговыми и цифровыми корректирующими контурами в адаптивных радиоканалах связи, которые описываются передаточными функциями и дифференциальными уравнениями, можно оценивать методами математического анализа, используя известные критерии Гурвица, Михайлова, Найквиста [2]. Для анализа относительной устойчивости этих систем АРМП целесообразно использовать частотные характеристики системы и логарифмический критерий

© В.И. Кащук

устойчивости, который позволяет очень просто находить запасы устойчивости по амплитуде и фазе.

Изложение основного материала

В данной работе методом математического моделирования определяются относительная устойчивость и робастность системы АРМП с аналоговым корректирующим контуром в адаптивном радиоканале связи и приведен анализ относительной устойчивости и робастности этой системы с точки зрения теории автоматического управления.

Рассмотрим математическую модель системы АРМП с двойным фазоопережающим контуром в адаптивном радиоканале связи, в которой аттенюатор перестраивается двигателем, который управляется напряжением с выхода корректирующего (двойного фазоопережающего) контура (см. рис.1).

Двигатель с регулирующим механизмом (Engine), посредством которого перестраивается мощный аттенюатор в системе на рис.1 опишем передаточной функцией

$$G_д(s) = \frac{1}{s(T_д s + 1)}, \qquad (1)$$

где постоянная времени двигателя $Тд = 1/12$ с. Передаточная функция двигателя содержит интегрирующее звено, поэтому замкнутый контур системы на рис. 1 обладает астатизмом первого порядка.

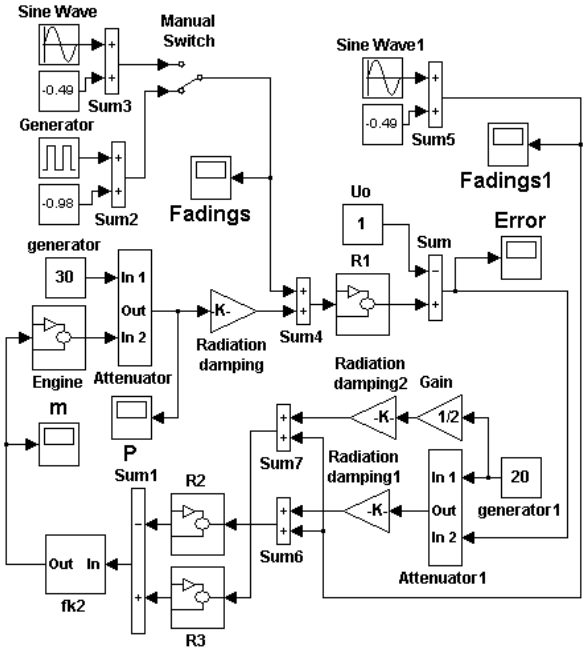

Рис. 1. Математическая модель системы АРМП с двойным фазоопережающим контуром (fk2), в которой аттенюатор перестраивается двигателем

Каждое из радиозвеньев R1-R3 представлено передаточной функцией

$$G_{р3}(s) = \frac{b}{s+b}e^{-\tau s} = \frac{10}{s+10}e^{-0.01s} \qquad (2)$$

или $$G_{р3}(s) = \frac{1}{Ts+1}e^{-\tau s} = \frac{1}{0{,}1s+1}e^{-0.01s}. \qquad (3)$$

Передаточную функцию двойного фазоопережающего контура запишем в виде

$$G(s) = \frac{(T_д s+1)(Ts+1)}{(kT_д s+1)(kTs+1)} = \\ = alf\frac{(s/12+1)(s/10+1)}{(s/120+1)(s/100+1)}, \qquad (4)$$

где $k = 0{,}1$

На основании формулы

$$G_3(s) = \exp(-2\tau s) \approx \\ \approx \left(\left(\tau^2/3\right)\cdot s^2 - \tau s + 1\right)\Big/\left(\left(\tau^2/3\right)\cdot s^2 - \tau s + 1\right) \qquad (5)$$

и (1-4) запишем передаточную функцию разомкнутой системы регулирования мощности радиопередатчика прямого канала связи с двойным фазоопережающим контуром и аттенюатором, который перестраивается двигателем, на вход которого подается сигнал управления с выхода корректирующего контура, в числовом виде:

$$G(s) = \frac{alf}{s(Ts+1)(kT_д s+1)(kTs+1)}\frac{\left(\tau^2/3\right)\cdot s^2 - \tau s + 1}{\left(\tau^2/3\right)\cdot s^2 - \tau s + 1} = \\ = \frac{alf\left(s^2/30000 - s/100 + 1\right)}{s(s/10+1)(s/100+1)(s/120+1)\left(s^2/30000 + s/100 + 1\right)}, \qquad (6)$$

где $$alf = K_a^2 k^2 K_y/100,$$

$$K_a = 1{,}5 \ \ (K_a^2 = 2{,}25), \ \ K_y = 30000.$$

Частотная характеристика для этой системы (рис.1) с передаточной функцией (6) определяется по формуле:

$$\phi(\omega) = -90^0 - \mathrm{arctg}\omega T_1 - \mathrm{arctg}\omega T_2 - \\ -\mathrm{arctg}\omega(T_д.10) - 2\tau\omega. \qquad (7)$$

Используя пакет Control System Toolbox 5.0 интерактивной системы MATLAB, определим логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ) системы (рис. 1) по передаточной функции (6). Программа расчета и полученные логарифмические частотные характеристики приведены на рис. 2 (запас

При расчетном коэффициенте усиления $alf = 6{,}75$ на основании логарифмических частотных характеристик системы находим (рис. 2): запас устойчивости по модулю $G_m = 12{,}4$ дБ на частоте $\omega_{cg} = 15{,}2$ рад/с; запас устойчивости по фазе $P_m = 47$ град на частоте $\omega_{cp} = 5{,}82$ рад/с.

Используя пакет Control System Toolbox 5.0 интерактивной системы MATLAB, определим логарифмические частотные характеристики системы (рис. 1) при разных отклонениях параметров объекта управления от расчетных.

```
alf=6.75; T1=0.1; T2=0.01; Td=1/120;
num=alf*[1/30000 -0.01 1];
f1=[1 0]; f2=[T1*T2 T1+T2 1];f3=[Td 1]; f4=[1/30000 0.01 1];
den=conv(conv(f1,f2),conv(f3,f4));
sys=tf(num,den);
[mag,phase,w]=bode(sys);
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(mag,phase,w);
margin(sys)
```

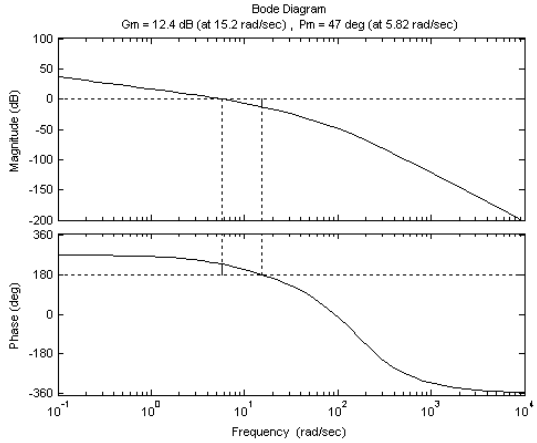

Рис. 2. ЛЧХ системы АРМП (рис. 1) с передаточной функцией (6)

Программа расчета и полученные логарифмические частотные характеристики при измененном на +20% коэффициенте усиления приведены на рис. 3.

```
alf=8.1; T1=0.1; T2=0.01; Td=1/120;
num=alf*[1/30000 -0.01 1];
f1=[1 0]; f2=[T1*T2 T1+T2 1]; f3=[1/30000 0.01 1];
den=conv(f1,conv(f2,f3));
sys=tf(num,den);
[mag,phase,w]=bode(sys);
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(mag,phase,w);
margin(sys)
```

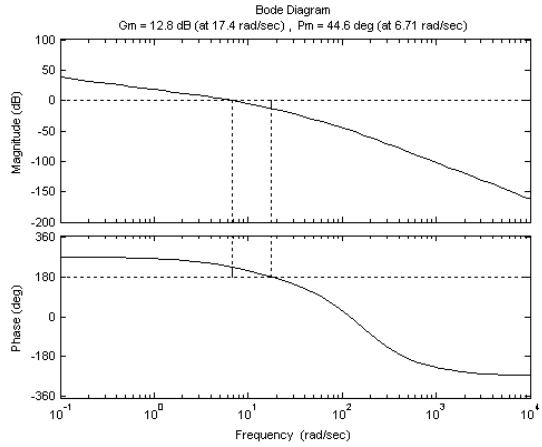

Рис. 3. ЛЧХ системы АРМП (рис. 1) с передаточной функцией (6) при изменении коэффициента усиления на +20%.

При изменении коэффициента усиления на +20% от расчетного $alf = 6,75$ на основании логарифмических частотных характеристик системы находим (рис. 3): запас устойчивости по модулю $G_m = 12,8$ дБ на частоте $\omega_{cg} = 17,4$ рад/с; запас устойчивости по фазе $P_m = 44,6$ град на частоте $\omega_{cp} = 6,71$ рад/с. Программа расчета и полученные логарифмические частотные характеристики при измененном на -20% коэффициенте усиления приведены на рис. 4.

```
alf=5.4; T1=0.1; T2=0.01; Td=1/120;
num=alf*[1/30000 -0.01 1];
f1=[1 0]; f2=[T1*T2 T1+T2 1]; f3=[1/30000 0.01 1];
den=conv(f1,conv(f2,f3));
sys=tf(num,den);
[mag,phase,w]=bode(sys);
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(mag,phase,w);
margin(sys)
```

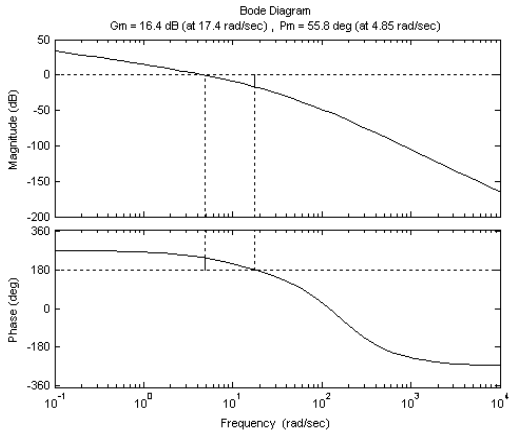

Рис. 4. ЛЧХ системы АРМП (рис. 1) с передаточной функцией (6) при изменении коэффициента усиления на -20%.

При изменении коэффициента усиления на -20% от расчетного $\alpha lf = 6,75$ на основании логарифмических частотных характеристик системы находим (рис. 4): запас устойчивости по модулю $G_m = 16,4$ дБ на частоте $\omega_{cg} = 17,4$ рад/с; запас устойчивости по фазе $P_m = 55,8$ град. на частоте $\omega_{cp} = 4,85$ рад/с. Таким образом, при изменении коэффициента усиления alf на $\pm 20\%$ запас устойчивости по модулю изменяется на $(+3,22 \ldots +32,25)$%, а запас устойчивости по фазе на $(-5,11 \ldots +18,72)$%. При изменении коэффициента усиления фазовая характеристика не изменяется.

Исследуем робастность системы при изменении постоянных времени на $\pm 20\%$ от их номинальных значений. Программа расчета и полученные логарифмические частотные характеристики при измененных на $+20\%$ постоянных времени приведены на рис. 5. На основании этих характеристик, используя обозначение, принятые в системе MATLAB, при постоянных времени T1=0.12; T2=0.012 определяем: запас устойчивости по модулю $G_m = 11,9$ дБ на частоте $\omega_{cg} = 13,6$ рад/с; запас устойчивости по фазе $P_m = 43,3$ град на частоте $\omega_{cp} = 5,59$ рад/с. Программа расчета и полученные логарифмические частотные характеристики при измененных на -20% постоянных времени приведены на рис. 6.

```
alf=6.75; T1=0.12; T2=0.012; Td=1/120;
num=alf*[1/30000 -0.01 1];
f1=[1 0]; f2=[T1*T2 T1+T2 1];f3=[Td 1]; f4=[1/30000 0.01 1];
den=conv(conv(f1,f2),conv(f3,f4));
sys=tf(num,den);
[mag,phase,w]=bode(sys);
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(mag,phase,w);
margin(sys)
```

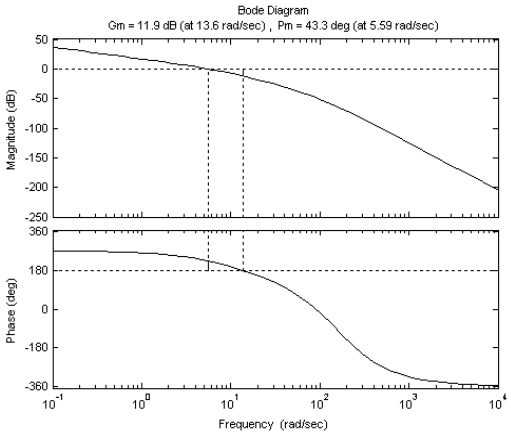

Рис. 5. ЛЧХ системы АРМП (рис. 1) с передаточной функцией (6) при изменении постоянных времени на +20%.

```
alf=6.75; T1=0.08; T2=0.008; Td=1/120;
num=alf*[1/30000 -0.01 1];
f1=[1 0]; f2=[T1*T2 T1+T2 1];f3=[Td 1]; f4=[1/30000 0.01 1];
den=conv(conv(f1,f2),conv(f3,f4));
sys=tf(num,den);
[mag,phase,w]=bode(sys);
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(mag,phase,w);
margin(sys)
```

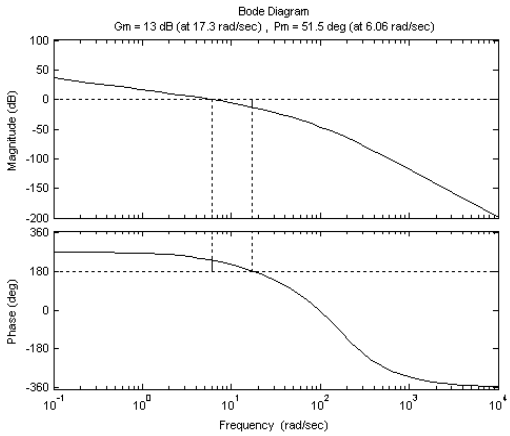

Рис. 6. ЛЧХ системы АРМП (рис. 1) с передаточной функцией (6) при изменении постоянных времени на -20%

На основании этих характеристик, используя обозначение, принятые в системе MATLAB, при постоянных времени T1=0.12; T2=0.012 определяем: запас устойчивости по модулю $G_m = 13$ дБ на частоте $\omega_{cg} = 17{,}3$ рад/с; запас устойчивости по фазе $P_m = 51{,}5$ град на частоте $\omega_{cp} = 6{,}06$ рад/с.

Таким образом, при изменении постоянной времени T на ±20% запас устойчивости по модулю изменяется на $(-4{,}04\ldots+4{,}83)$ %, а запас с устойчивости по фазе на $(-7{,}88\ldots+9{,}57)$%. При изменении постоянной времени изменяются и логарифмическая амплитудная и фазовая характеристики системы.

Как отмечалось, достаточными запасами стойкости по модулю считают $G_m = 6...20$ дБ, по фазе $P_m = 30...60$ град. Поэтому можно констатировать, что данная система имеет очень хорошие запасы устойчивости и имеет хорошую робастность.

Выводы

Результаты исследования дают возможность сделать вывод, что система имеет с точки зрения теории автоматического управления довольно хорошие относительную устойчивость и робастность, которые обеспечивают аналоговое корректирующие устройств – двойной фазоопережающий контур для системы на рис. 1. Поэтому применение этого корректирующего контура для систем автоматического регулирования мощности излучения радиопередатчиков в адаптивных каналах радиосвязи, математическая модель которого представлена выше, есть целесообразным и перспективным.

Список литературы

1. Гостєв В.І. Системи автоматичного регулювання потужності передавача в каналах радіозв'язку / В.І. Гостєв, Н.І. Кунах, М.І. Науменко. – К.: Радіоаматор, 2007.- 332 с.

2. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.

3. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5+Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 576 с.

Поступила в редколлегию 2.09.2014

Рецензент: д-р техн. наук проф. Н.И. Кунах, Государственный университет телекоммуникаций, Киев.

АНАЛІЗ ВІДНОСНОЇ СТІЙКОСТІ І РОБАСТНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ПЕРЕДАВАЧА З ПОДВІЙНИМ ФАЗОВИПЕРЕДЖАЮЧИМ КОНТУРОМ

В.І. Кащук

В даній роботі методом математичного моделювання в інтерактивній системі MATLAB визначається відносна стійкість і робастність системи автоматичного регулювання потужності випромінювання передавача з аналоговим коректуючим контуром в адаптивному радіоканалі зв'язку і приведений аналіз відносної стійкості і робастності цієї системи з точки зору теорії автоматичного управління. Показано, що використання цього коректуючого контуру в системі автоматичного регулювання потужності випромінювання передавача, є доцільним і перспективним.

***Ключові слова**: автоматичне регулювання потужності випромінювання передавача, відносна стійкість, робастність.*

THE ANALYSIS OF THE RELATIVE STABILITY AND ROBUSTNESS OF SYSTEM ACPT WITH THE DOUBLE PHASE-ADVANCE CIRCUIT

V.I. Kaschuk

In the paper the relative stability and robustness of the system of automatic control of the power of the transmitter radiations with analogues correcting circuit in the adaptive radio channel of communication is defined by the method of mathematical simulation in the MATLAB interactive system. Also, an analysis the relative stability and robustness of the system is done with the point of view of the theory of automatic control. It is shown that the use of this correcting circuit in the system of automatic control of the power of the transmitter radiations is reasonable and perspective.

Keywords: *automatic control of the power of the transmitter radiations, relative stability, robustness.*