

Профессор В.С. Кудряшов, доцент А.В. Иванов,
аспирант А.А. Гайдин

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра информационных и управляющих систем,
тел. (473) 255-38-75

Расчёт и моделирование цифровой робастной системы управления связанным нестационарным объектом

Рассматривается синтез робастной цифровой системы управления многосвязным нестационарным объектом на примере процесса получения аммиака. Приводятся сравнительные результаты моделирования дискретной системы управления с использованием трёх различных критериев оптимизации. Описание системы представлено в передаточных функциях вход-выход. Полученные результаты распространяются на класс многосвязных несимметричных объектов управления.

The synthesis of robust digital control systems of multiply non-stationary object on the example of ammonia obtaining is considered. We present the results of the comparative modeling discrete control system using three different optimization criteria. Description of the system is represented in the transfer functions of the input-output. The results apply to the class of multi-connected single-ended control objects.

Ключевые слова: многосвязная система регулирования, нестационарный объект управления, оценка устойчивости, синтез аммиака

Параметры моделей каналов объекта управления в процессе эксплуатации зачастую претерпевают значительные изменения, при этом большинство технологических объектов являются многосвязными. Разработанные способы управления такими объектами подразумевают изменение настроечных параметров системы с течением времени. Перенастройка требует наличия уточнённых данных о параметрах модели объекта, то есть необходимо проведение текущей идентификации, что не всегда возможно, тем более для многосвязных объектов. Применение же принципов робастного управления обеспечивает гарантированное качество и требуемый запас устойчивости на протяжении всего эксплуатационного периода [1]. В работе поставлена задача разработки, моделирования и исследования робастной цифровой системы управления многосвязным объектом, включающая следующие этапы:

- выбор и обоснование критериев управления;
- оптимизация управляющей части системы по предложенным критериям;
- моделирование системы при возможной вариации параметров модели объекта со связанными параметрами в течение эксплуатационного периода;

– исследование функционирования робастной системы по различным критериям синтеза и оценка эффективности работы по показателям качества и запасу устойчивости.

При синтезе систем регулирования и расчёте оптимальных настроечных параметров цифровых регуляторов наиболее часто применяется критерий минимума интегральной квадратичной ошибки (1). В дискретной форме для многосвязного объекта этот критерий можно представить следующим образом:

$$S_1 = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{i=1}^m e_{ij}^2 \right] \quad (1)$$

где: S_1 – интегральная квадратичная ошибка;
 e_{ij} – рассогласование по каналам управления;
 n – число параметров управления; m – количество точек разбиения переходного процесса.

Вместе с тем, при синтезе робастной системы управления одним из требований является не только обеспечение качества управления, но и достижение требуемого запаса устойчивости, поэтому введём комплексный критерий (2) [2]:

$$S_2 = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{i=1}^m e_{ij}^2 + \frac{\alpha_j}{\rho_j} \right] \quad (2)$$

$$\rho = 1 - |\lambda_{max}|.$$

где: S_2 – комплексный критерий, учитывающий интегральную квадратичную ошибку и запас устойчивости системы; ρ – запас устойчивости системы;

λ_{max} – максимальный корень характеристического полинома канала управления; α_j – весовой коэффициент по каналам управления.

Кроме того модифицируем критерий (1), учитывающий качество управления не только при номинальном состоянии объекта, но и в конце эксплуатационного периода, то есть возможный интервал изменения параметров модели объекта:

$$S_3 = \sum_{j=1}^n [\sum_{i=1}^m (e_{ij}^{HC})^2 + \sum_{i=1}^m (e_{ij}^{KC})^2] \quad (3)$$

где: S_3 – суммарная интегральная квадратичная ошибка в начальном и конечном состоянии объекта; e_{ij}^{HC} , e_{ij}^{KC} – рассогласование по каналам управления в начальном и конечном состоянии.

В качестве примера многосвязного объекта рассмотрим процесс синтеза аммиака (рисунок - 1) [2, 3].

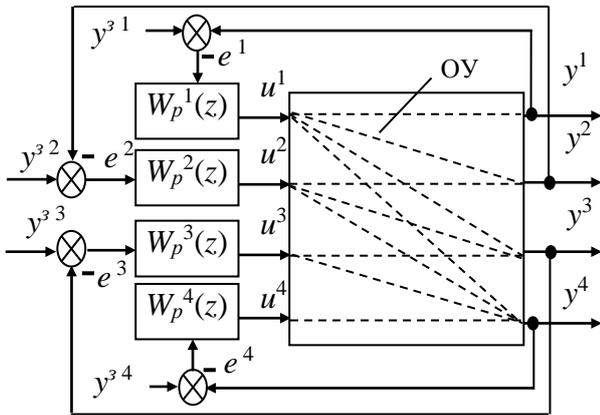


Рисунок 1 - НЦСР процессом синтеза аммиака: ОУ – объект управления; y^1 - y^4 – измеряемые выходы системы (температура в слоях катализатора); y^{31} - y^{34} – задающие воздействия; e^1 - e^4 – ошибки регулирования; u^1 - u^4 – управляющие воздействия (степени открытия заслонок на байпасных потоках); $W_p^1(z)$ - $W_p^4(z)$ – дискретные передаточные функции цифровых регуляторов.

Нестационарные свойства объекта обусловлены изменением активности катализатора с течением времени [4], в связи с этим рассмотрим возможный диапазон изменения параметров моделей объекта по отношению к номинальному состоянию (Н.С.) в процессе функционирования (таблица 1)

С целью сравнительного анализа робастной системы регулирования, синтезированной по критериям (2,3) с системой, рассчитанной по критерию (1), проведена оптимизация цифровых регуляторов второго порядка по предложенным критериям методом покоординатного спуска. В комплексном

критерии S_2 большое значение имеет величина весового множителя α , устанавливающего соотношение между запасом устойчивости и интегральной квадратичной оценки. Ранее установлено [2], что для данного объекта управления при значении $\alpha=30$ составляющие критерия учитываются в равной степени. Динамические характеристики системы для первых двух выходов (рисунок1) представлены на рисунках 2,3.

Т а б л и ц а 1

Изменение параметров моделей каналов объекта в процессе эксплуатации

Состояние системы	Канал	Значения параметров модели ОУ		
		Дискретные		
		a_1	b , %мас/(т/ч)	d , такт
-30%	$(W_o^u^{[1][1]})$	0,859	-0,476	10
	$(W_o^u^{[2][2]})$	0,880	-0,190	16
	$(W_o^u^{[1][2]})$	0,895	-0,062	18
-20%	$(W_o^u^{[1][1]})$	0,877	-0,416	10
	$(W_o^u^{[2][2]})$	0,895	-0,166	16
	$(W_o^u^{[1][2]})$	0,908	-0,054	18
-10%	$(W_o^u^{[1][1]})$	0,891	-0,370	10
	$(W_o^u^{[2][2]})$	0,907	-0,148	16
	$(W_o^u^{[1][2]})$	0,918	-0,048	18
н.с.	$(W_o^u^{[1][1]})$	0,901	-0,333	10
	$(W_o^u^{[2][2]})$	0,916	-0,133	16
	$(W_o^u^{[1][2]})$	0,927	-0,043	18
+10%	$(W_o^u^{[1][1]})$	0,910	-0,303	10
	$(W_o^u^{[2][2]})$	0,924	-0,121	16
	$(W_o^u^{[1][2]})$	0,933	-0,039	18
+20%	$(W_o^u^{[1][1]})$	0,918	-0,277	10
	$(W_o^u^{[2][2]})$	0,930	-0,111	16
	$(W_o^u^{[1][2]})$	0,939	-0,037	18
+30%	$(W_o^u^{[1][1]})$	0,924	-0,256	10
	$(W_o^u^{[2][2]})$	0,935	-0,103	16
	$(W_o^u^{[1][2]})$	0,943	-0,034	18

При синтезе робастной системы управления необходимо учитывать максимально возможный интервал изменения параметров объекта управления в процессе эксплуатации. Для исследования изменения динамики системы управления проведена серия численных экспериментов для критерия S_3 (рисунки 4,5). Сравнение предложенных критериев проводилось по показателям качества и корням характеристического полинома системы.

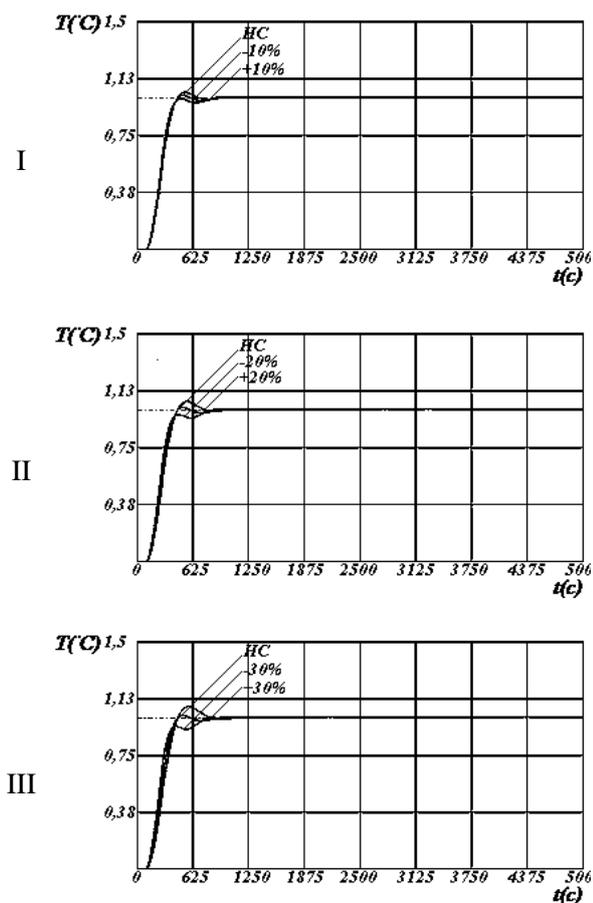


Рисунок 2 - Динамические характеристики системы по $y^{[1]}$ с настройками регулятора по критерию S_2 , где: I, II, III – изменение параметров модели на 10%, 20%, и 30% соответственно.

Анализ показателей качества (таблицы 2, 3) динамических характеристик позволяет сделать выводы, что наименьшими ошибками обладает система, синтезированная по критерию S_1 и по S_3 в номинальном состоянии. Комплексный критерий S_2 показал незначительное ухудшение данного показателя: отклонение от лучших показателей не превышает 10%. При этом суммарный интегрально-квадратичный критерий S_3 обладает наилучшей стабильностью в процессе эксплуатации, так как изменение не превысило 2,5%.

Наибольший запас устойчивости системы достигается в случае применения комплексного критерия S_2 . Критерии S_1 и S_3 в номинальном состоянии обладают схожими значениями запаса устойчивости. В процессе эксплуатации системы происходит увеличение аperiodических запаздываний по каналам модели объекта, что в свою очередь приводит к увеличению запаса устойчивости.

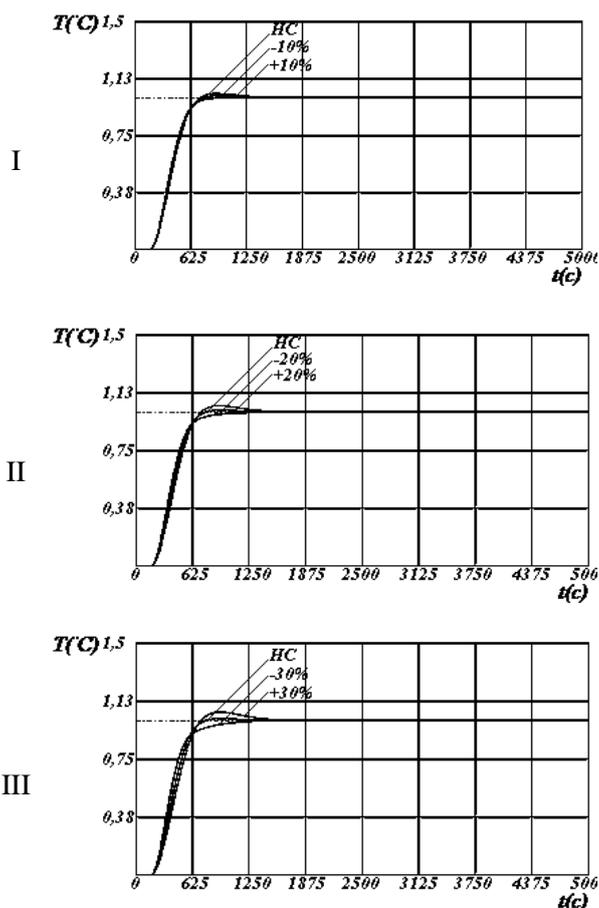


Рисунок 3 - Динамические характеристики системы по $y^{[2]}$ с настройками регулятора по критерию S_2 , где: I, II, III – изменение параметров модели на 10%, 20%, и 30% соответственно.

Изменение качественных показателей системы в процессе эксплуатации проявляется для каждого из предложенных критериев, однако разница интегральной квадратичной оценки незначительна (таблицы 2, 3; рисунки 6, 7).

Анализ изменения времени регулирования системы управления позволяет сделать вывод, что наилучшими показателями обладает система, синтезированная по комплексному критерию S_2 по сравнению с S_1 и S_3 (рисунки 8, 9). Для критериев S_1 и S_3 с увеличением срока эксплуатации время регулирования по $y^{[1]}$ уменьшается, а по $y^{[2]}$ увеличивается, тогда как для критерия S_2 значения варьируются незначительно и почти в 2 раза меньше чем при S_1 и S_3 .

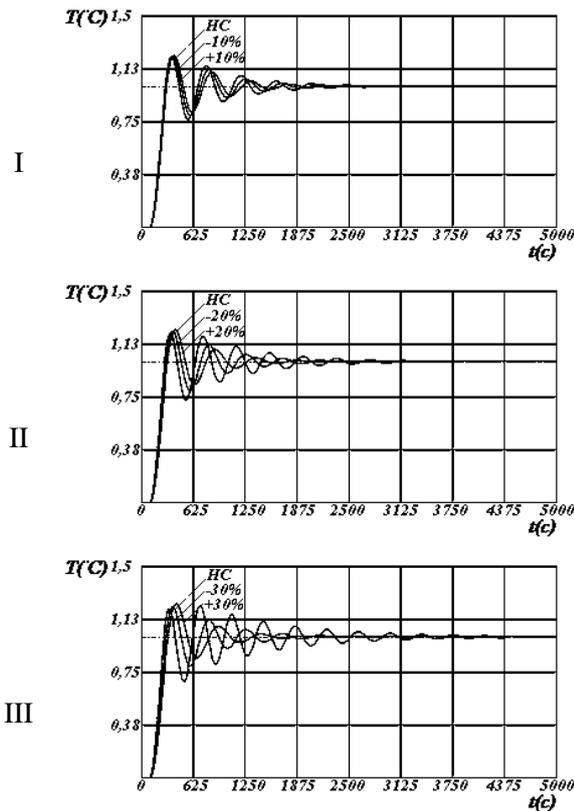


Рисунок 4 - Динамические характеристики системы по $y^{[1]}$ с настройками регулятора по критерию S_3 , где: I, II, III – изменение параметров модели на 10%, 20%, и 30% соответственно.

Т а б л и ц а 2

Изменение интегральной оценки выхода $y^{[1]}$ системы для различных критериев

Состояние объекта	Первый выход системы		
	S_1	S_2	S_3
-30%	18,473	19,823	19,505
-20%	18,515	20,31	18,976
-10%	18,729	20,798	18,925
н.с.	19,033	21,287	19,073
+10%	19,388	21,777	19,323
+20%	19,777	22,267	19,633
+30%	20,188	22,758	19,98

Динамическая ошибка для критерия S_2 так же оказались в 2-3 раза меньше значений полученных при настройке по критериям S_1 и S_3 (рисунок 10).

Оценка значений максимальных корней характеристического полинома системы (рисунок 12) для S_2 показала, что при изменении параметров модели объекта от номинальных значений происходит увеличение максимального корня, что свидетельствует об уменьшении запаса устойчивости. Для критериев S_1 и S_3 наблюдается уменьшение значений корней. Вместе с тем наименьшим по модулю максимальным корнем обладает система, синтезированная по критерию S_2 с весовым коэффициентом $\alpha=30$.

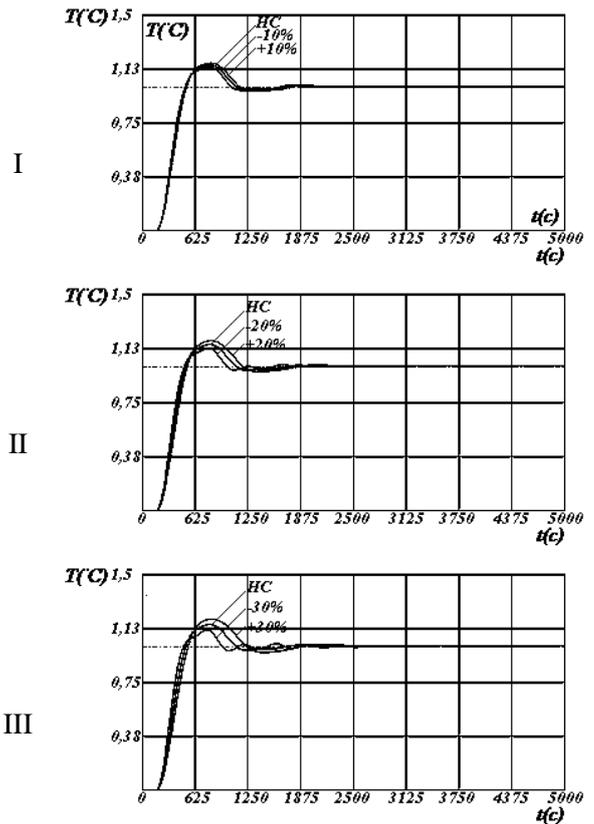


Рисунок 5 - Динамические характеристики системы по $y^{[2]}$ с настройками регулятора по критерию S_3 , где: I, II, III – изменение параметров модели на 10%, 20%, и 30% соответственно.

Т а б л и ц а 3

Изменение интегральной оценки выхода $y^{[2]}$ системы для различных критериев

Состояние объекта	Второй выход системы		
	S_1	S_2	S_3
-30%	27,863	31,15	27,92
-20%	28,663	31,817	28,687
-10%	29,457	32,478	29,456
н.с.	30,244	33,135	30,221
+10%	31,023	33,788	30,981
+20%	31,794	34,435	31,734
+30%	32,559	35,08	32,481

Таким образом, в результате численного моделирования системы и оценки показателей качества при вариации параметров моделей объекта для рассмотренных критериев наилучшим является комплексный критерий S_2 , обеспечивающий наибольший запас устойчивости системы и достаточно хорошее качество регулирования. А такие показатели как время регулирования и динамическая ошибка для критерия S_2 меньше, чем для S_1, S_3 .

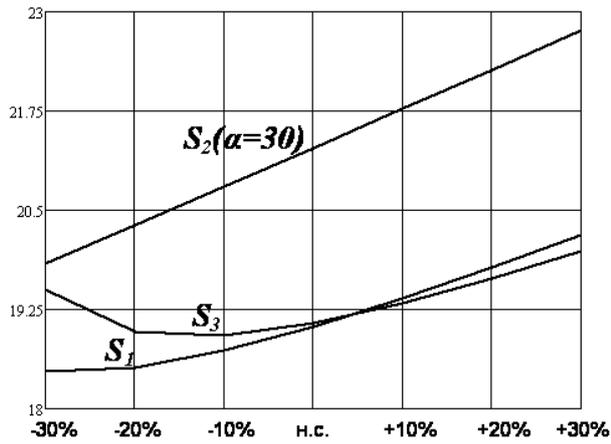


Рисунок 6 - Изменение интегральной квадратичной оценки по $y^{(1)}$

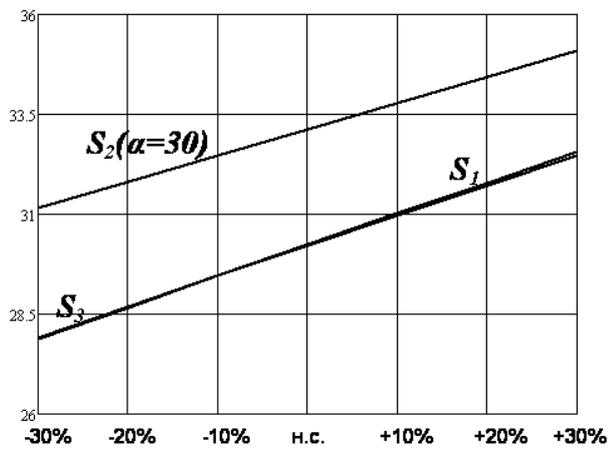


Рисунок 7 - Изменение интегральной квадратичной оценки по $y^{(2)}$

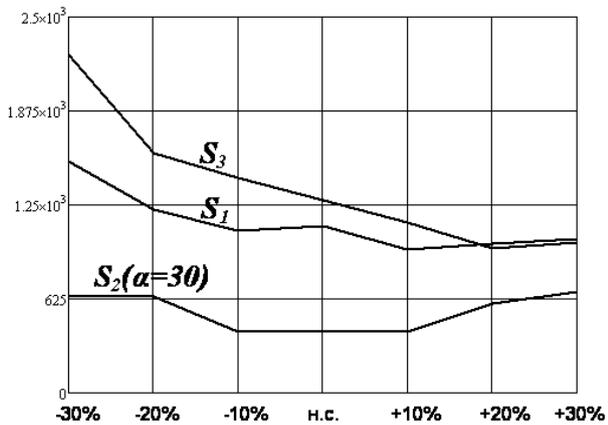


Рисунок 8 - Изменение времени регулирования системы для $y^{(1)}$

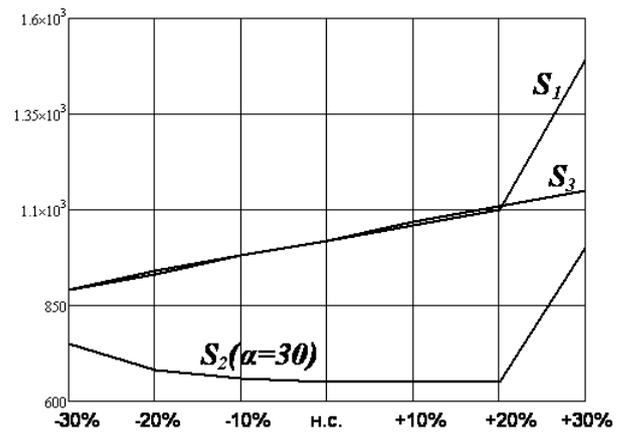


Рисунок 9 - Изменение времени регулирования системы для $y^{(2)}$

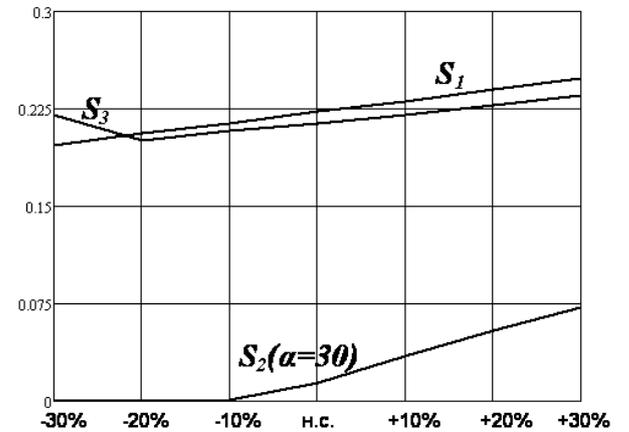


Рисунок 10 - Изменение перерегулирования системы для $y^{(1)}$

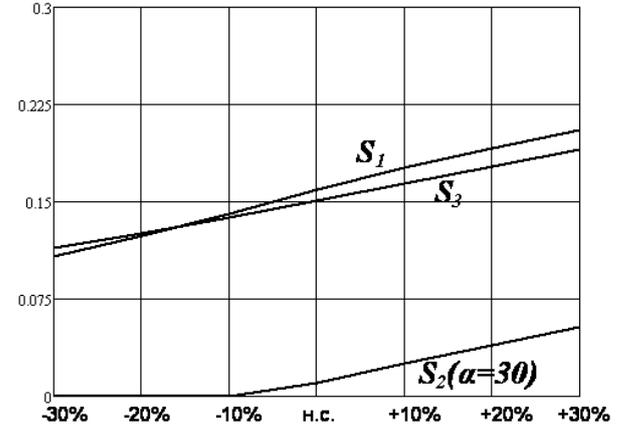


Рисунок 11 - Изменение перерегулирования системы для $y^{(2)}$

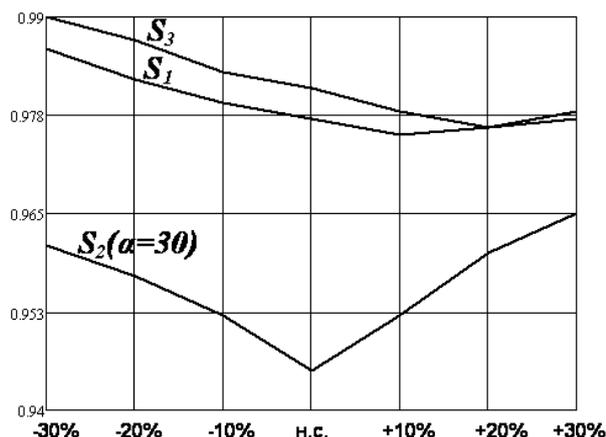


Рисунок 12 - Изменение модуля максимального корня характеристического полинома системы

ЛИТЕРАТУРА

1 Поляк, Б.Т. Робастная устойчивость и управление [Текст] / Б.Т. Поляк, П.С. Щербakov. – М.: Наука, 2002. – 303 с.

2 Кудряшов, В.С. Синтез и исследование робастной цифровой системы управления многосвязным нестационарным объектом с применением комплексного критерия [Текст] / В.С. Кудряшов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. - №4. - С. 10-17.

3 Кудряшов, В.С. Идентификация каналов многосвязного нестационарного объекта [Текст] / В.С. Кудряшов, С.В. Рязанцев, А.В. Иванов // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2007. - № 7. - С. 16–21.

4 Янковский, Н.А. Аммиак. Вопросы технологии [Текст] / Н.А. Янковский, И.М. Демиденко, В.А. Степанов. – Донецк: ГИК “Новая печать”, 2001. – 497 с.

REFERENCES

1 Polyak, B.T. Robust stability and control [Text] / B.T. Polyak, P.S. Shcherbakov. – M.: Nauka, 2002. – 303 p.

2 Kudryashov, V.S. Synthesis and study of robust digital control system multiply non-stationary object using a complex criterion [Text] / V.S. Kudryashov // Instruments and Systems. Management, monitoring, diagnostics. - 2013. - № 4. - P. 10 - 17.

3 Kudryashov, V.S. Identification channels multiply non-stationary object [Text] / V.S. Kudryashov, S.V. Ryazancev, A.V. Ivanov // Mechatronics, automation, control. - 2007. - № 7. - P. 16-21.

4 Jankowski, N.A. Ammonia. Technology issues [Text] / N.A. Jankowski, I.M. Demidenko, V.A. Stepanov. - Donetsk: GIK "Novaya pechat", 2001. - 497 p.