

Для подавления переходных перенапряжений, возникающих при соединении и разъединении к стабилизатору мощных нагрузок, в качестве ограничителя пере-напряжения используется внутренняя нагрузка.

Применение новой схемы защиты и индикации обеспечивает надежное вы-ключение стабилизатора при перегрузках со следующей индикацией и хранением события.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Набиев Р.Н., Велиев С.М., Гашимова А.Ю.* Методика расчета автотрансформатора для электронного стабилизатора переменного сетевого напряжения // МАА-nın elmi əsərləri. – 2004. – № 2. – Р. 139-149.
2. *Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А.* Полупроводниковые приборы / Под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергомиздат, 1990. – 590 с.
3. *Кривецкий А.* Нормализатор напряжения сети // Схемотехника. – 2007. – № 4. – С. 34-37.
4. *Володин В.Я.* Компенсатор отклонения напряжения сети // РадиоХобби. – 2004. – № 1. <http://valvolodin.narod.ru/articles/Kompens.pdf>.
5. *Пашаев А.М., Набиев Р.Н., Гараев Г.И.* Схема защиты от одновременного открывания двух или более симисторов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 2 (127). – С. 130-135.
6. *Paşayev A.M., Nəbiyev R.N., Qarayev Q.İ.* Simistorlu stabilizatorlarda yüksək cəldlikli elektron qoruyucusu // МАА-нын elmi əsərləri. – 2007. – № 2. – Р. 3-10.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Набиев Расим Насиб оглы – Национальная академия авиации Азербайджана (г. Баку); e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; AZ1045, г. Баку, пос. Bina, 25 km.; д.т.н.; начальник отдела Авиационной электроники НИИ ТАП.

Гараев Гадир Исахан – д.т.н.

Nabiev Rasim Nasib Ogli – National Aviation Academy of Azerbaijan (Baku city); e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; AZ1045, Baku city, Pos Bina; dr. of eng. sc.; chief of Electronic Aviation National Aviation Academy of Azerbaijan.

Garaev Gadir Isakhan – dr. of eng. sc.

УДК 621.3.013; 629.054

А.З. Бадалов, Р.Н. Набиев, А.З. Мамедов

УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОЙ И СТАБИЛЬНОЙ ЛЕВИТАЦИИ МАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА

Рассмотрены вопросы, касающиеся исследования динамических свойств систем магнитной левитации. Ставится задача оценки показателей качества динамически скорректированной системы магнитной левитации (СМЛ) с целью определения ее запасов устойчивости. В работе приведена принципиальная электрическая схема СМЛ и ее математическая модель. Представлены результаты расчетов параметров необходимых и достаточных условий обеспечения состояния устойчивой и стабильной левитации магнитного сердечника. Показаны графики зависимостей параметров передаточных функций модели СМЛ от параметров соленоида.

Левитация; сердечник; соленоид; магнитная левитация.

A.Z. Badalov, R.N. Nabiev, A.Z. Mamedov

STABILITY CONDITIONS OF STEADY AND STABLE LEVITATION OF THE MAGNETIC CORE

In the article questions concerning researches of dynamic properties of systems of a magnetic levitation are considered. The problem of quality performance estimation for dynamically corrected system of magnetic levitation (SML) is supposed to be solved for defining its stability margin. There is introduced the principal electrical scheme and its mathematical model. The results of calculations of parameters of necessary and sufficient conditions of maintenance of a condition of a steady and stable levitation of the magnetic core are resulted. Diagrams of SML's model transfer functions' parameters against the solenoid parameters are given.

Levitation; the core; the solenoid; magnetic levitation.

При разработке и проектировании систем магнитной левитации (СМЛ) для контроля параметров веществ, материалов и изделий возникает задача определения и оценки динамических показателей качества системы [1].

В связи с тем, что СМЛ по своей структуре является замкнутой системой автоматического регулирования тока соленоида, то ей присуще состояние неустойчивости, которое характеризуется появлением автоколебаний левитирующего тела – магнитного сердечника. Для исключения автоколебаний левитирующего сердечника в контур воздействия системы вводится динамическое корректирующее звено [3, 4], которое значительно улучшает динамическое качество системы и расширяет границу области ее устойчивости [3–8]. Это делает актуальной задачу проведения теоретических и экспериментальных исследований свойств динамически скорректированной системы с целью определения необходимых и достаточных условий для обеспечения состояния стабильной устойчивой левитации магнитного сердечника и по ним определить границу области устойчивости по передаточному коэффициенту $K_{гр}$ участка разомкнутой цепи воздействий и по коэффициенту усиления $K_{у,гр}$ электронного усилителя.

На рис. 1 приведена принципиальная электрическая схема аналогового электронного блока СМЛ с использованием интегрального датчика Холла и измерителем температуры. Она содержит тяговый узел 1, состоящий из соленоида 2 и магнитного сердечника 3, измерительную камеру 4, интегральный датчик Холла 5, аналоговый блок 6 управления током соленоида.

Сам электронный блок содержит операционный усилитель LM308, силовой транзистор 8 типа BD148, в эмиттерную цепь которого включены последовательно обмотка соленоида 2 и измерительный резистор $R_{из}$, выход которого в виде напряжения левитации $U_{л}$ подается на вход формирователя сигнала, пропорционального измеряемому параметру объекта контроля.

Для повышения точности определения результатов измерения в реальных условиях эксплуатации в схему электронного блока введен также узел температурной коррекции. Измеритель температуры по принципиальной схеме аналогичен схеме электронного усилителя системы левитации. В качестве термодатчика здесь использован интегральный терморезистор типа TD5A.

Датчик температуры 9 (терморезистор) укреплен на нижней щеке каркаса соленоида. Он максимально приближен к зоне размещения левитирующего магнитного сердечника. Терморезистор включен по схеме делителя напряжения, выходной сигнал которого подается на прямой вход операционного усилителя 10. Настройка схемы в начальное состояние осуществляется с помощью регулировочного сопротивления 11, подключенного в цепь инверсного входа усилителя 10. Установка коэффициента усиления операционного усилителя осуществляется с помощью регулировочного сопротивления 12. Сигнал напряжения $U_{т}$, пропорциональной температуре рабочей зоны левитирующего магнитного сердечника, подается на аналоговый вход микроконтроллера.

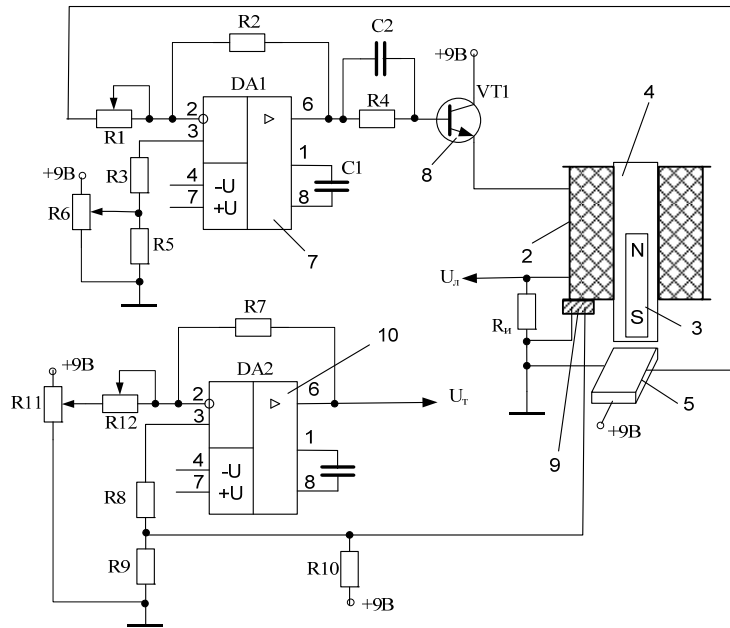


Рис. 1. Схема СМЛ с измерителем температуры

На основе разработанной функциональной схемы СМЛ составлена ее структурная схема (рис. 2), на которой все функциональные элементы представлены в виде динамических звеньев с передаточными функциями вида [8, 9]:

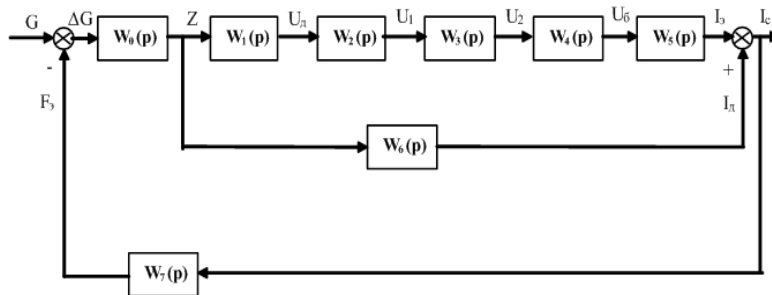


Рис. 2. Структурная схема системы магнитной левитации

♦ для силового блока: $W_0(p) = \frac{Z}{\Delta G} = \frac{1}{mp^2 + R_a \cdot p}$,

где $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования, c^{-1} ; m – масса магнитного сердечника, z ;

$R_a = K_3 \cdot \frac{8\pi \cdot \mu_c \cdot b}{(n^2 + 1) - (n^2 - 1) / \ln(n)}$, $\frac{H \cdot c}{m}$ – коэффициент аэродинамического демпфи-

рования; μ_c – динамическая вязкость среды, $H \cdot c / m^2$ (для воздуха $\mu_c = 1.7 \cdot 10^{-5} H \cdot c / m^2$ при $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$); $n = d_k / d_c$ – коэффициент проходного сечения (кольца) между стенкой измерительной камеры и поверхностью сердечника; d_k – диаметр внутренней

стенки измерительной камеры, мм; d_c – наружный диаметр сердечника, мм; b – длина сердечника, м; K_3 – коэффициент эксцентриситета осей сердечника и измерительной камеры.

♦ для датчика перемещения сердечника: $W_1(p) = \frac{U_\partial}{Z} = K_n$, где U_∂ – напряжения датчика;

♦ для 1-го каскада усиления электронного блока: $W_2(p) = \frac{U_1}{U_\partial} = K_{y1}$;

♦ для 2-го каскада усиления электронного блока: $W_3(p) = \frac{U_2}{U_1} = K_{y2}$;

♦ для делителя напряжения с корректирующим звеном в виде RC-цепи:

$$W_4(p) = \frac{U_B}{U_2} = \frac{K_\partial \cdot (T_k \cdot p + 1)}{K_\partial \cdot T_k \cdot p + 1},$$

где $K_\partial = \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_4}$ – коэффициент делителя напряжения; $T_k = R_4 \cdot C_2$ – постоянная времени корректирующего звена, с;

♦ для усилителя тока: $W_5(p) = \frac{I_\partial}{U_B} = -\frac{K_c}{(T_\partial \cdot p + 1)}$,

где $K_c = 1 / R_3$ – передаточный коэффициент транзисторного усилителя тока, Ом⁻¹;

$R_3 = R_c + R_n$ – сопротивление эмиттерной цепи, Ом; $T_\partial = L / R_c$ – постоянная времени соленоида; L – индуктивность обмотки соленоида, Гн;

♦ для звена собственного электромагнитного демпфирования:

$$W_6(p) = \frac{I_\partial}{Z} = \frac{K_\partial \cdot K_c \cdot p}{(T_\partial \cdot p + 1)},$$

где $T_\partial = \frac{L}{R_3}$ – постоянная времени эмиттерной цепи, с.

♦ для звена обратной связи: $W_7(p) = \frac{F_\partial}{I_c} = K_o$.

Далее в соответствии с правилами преобразования структурных схем систем автоматического регулирования составлена математическая модель СМЛ в виде передаточной функции замкнутой системы автоматического регулирования тока соленоида, устанавливающая связь между общим током соленоида I_c и весом G левитирующего магнитного сердечника:

$$W_k(p) = \frac{1}{K_0} \cdot \frac{\tau_2^2 \cdot p^2 + \tau_1 \cdot p + 1}{a_0 \cdot p^4 + a_1 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_3 \cdot p + a_4},$$

где

$$a_0 = \frac{m \cdot T_\partial \cdot K_\partial \cdot T_k}{K \cdot K_0}, \text{ с}^4; \quad a_1 = \frac{m \cdot (T_\partial + K_\partial \cdot T_k) + R_a \cdot T_\partial \cdot K_\partial \cdot T_k}{K \cdot K_0}, \text{ с}^3;$$

$$a_2 = \frac{m + R_a \cdot (T_{\vartheta} + K_{\delta} \cdot T_{\kappa}) + K_c \cdot K_0^2 \cdot K_{\delta} \cdot T_{\kappa}}{K \cdot K_0}, \text{ с}^2;$$

$$a_3 = \frac{R_a + K_c \cdot K_0^2 + K \cdot K_0 \cdot T_k}{K \cdot K_0}, \text{ с}; \quad a_4 = 1, \text{ с}.$$

Необходимые и достаточные условия ее устойчивости приведены к следующему неравенству относительно передаточного коэффициента системы $K \cdot K_0$:

$$K = K_n \cdot K_{y1} \cdot K_{y2} \cdot K_{\delta} \cdot K_0 \cdot T_k \cdot (K \cdot K_0)^2 + (2 \cdot A_0 \cdot B \cdot T_k + A_1^2 - A_1 \cdot A_2 \cdot T_k) \cdot (K \cdot K_0) - B \cdot (A_1 \cdot A_2 - A_0 \cdot B) \leq 0,$$

где

$$A_0 = m \cdot T_{\vartheta} \cdot K_{\delta} \cdot T_{\kappa}; \quad A_1 = m \cdot (T_{\vartheta} + K_{\delta} \cdot T_{\kappa}) + R_a \cdot T_{\vartheta} \cdot K_{\delta} \cdot T_{\kappa};$$

$$A_2 = m + R_a \cdot (T_{\vartheta} + K_{\delta} \cdot T_{\kappa}) + K_c \cdot K_0^2 \cdot K_{\delta} \cdot T_{\kappa}; \quad B = R_a + K_c \cdot K_0^2; \quad T_k = R_k \cdot C_k.$$

Произведена оценка динамических показателей качества системы, которые, являясь одной из основных задач ее комплексного анализа, имеют важное практическое значение при исследовании свойств помехоустойчивости СМЛ.

Известно, что в целом динамические показатели качества системы напрямую зависят от характера переходных процессов в ней, которые возникают при воздействии на левитирующее тело различных факторов со стороны внешней среды. В этой связи расчет и моделирование переходного процесса позволяет оценить так называемую динамическую погрешность системы при измерении технологических параметров, претерпевающих по ходу процесса частые изменения (в том числе периодические колебания). Это особенно важно при оценке динамического качества авиационных приборов, функционирующих на принципе магнитной левитации.

В качестве функции переходного процесса рассматривалась зависимость тока левитации от времени $I_c(t)$, которая определялась с помощью обратного преобразования Лапласа. Полученное соотношение использовалось для расчета значений функции $I_c(t)$ в зависимости от конструктивных параметров соленоида (R и h) и используемой электронной схемы при оптимальных значениях постоянной времени корректирующего звена T_{kmax} , как для фиксируемых, так и для варьируемых параметров. Отметим, что функцию отклика $I_c(t)$ имеет колебательно-затухающий характер с точкой максимума при $t_{max} = 0,025$ мс, а основные динамические показатели качества системы характеризуются следующими значениями:

- ◆ максимальное значение функции отклика (при $t_{max} = 0,025$ мс):

$$I_{c \max} = 0,618 \text{ А};$$

- ◆ установившееся значение функции отклика (при $t_{уст} = 2$ с): $I_{c \text{ уст}} = 0,312 \text{ А};$
- ◆ степень перерегулирования:

$$\frac{I_{c \max} - I_{c \text{ уст}}}{I_{c \text{ уст}}} \cdot 100 \% = \frac{0,618 - 0,312}{0,312} \cdot 100 \% = 98 \%;$$

- ◆ время задержки распространения сигнала: $t_{з.п.с} = 1,6$ с;
- ◆ частота колебаний выходной величины I_c :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{133 \text{ рад/с}}{6,28 \text{ рад}} = 21,2 \text{ Гц}.$$

В связи с тем, что собственная частота $f = 21,2$ Гц является достаточно высокой для данной системы, колебания левитирующего сердечника и тока левитации визуально не наблюдаются и магнитный сердечник без видимых колебаний устанавливается в состояние левитации достаточно быстро и с хорошим запасом устойчивости. Исследовано влияние запаса устойчивости на динамические показатели качества при различных параметрах соленоида R и h .

Результаты исследований, приведенные в виде графиков, позволяют схемными методами определить значения анализируемых динамических показателей качества для конкретных R и h .

На базе произведенного анализа степени влияния постоянной времени T_k корректирующего звена на граничные значения $K_{гр}(T_k)$ и $K_{у.гр}(T_k)$, т.е. на величину запаса устойчивости СМЛ, построены графики зависимостей граничных значений коэффициента усиления $K_y(T_k)$ от постоянной времени T_k для различных конструктивных параметров соленоида (h и R) (рис. 3).

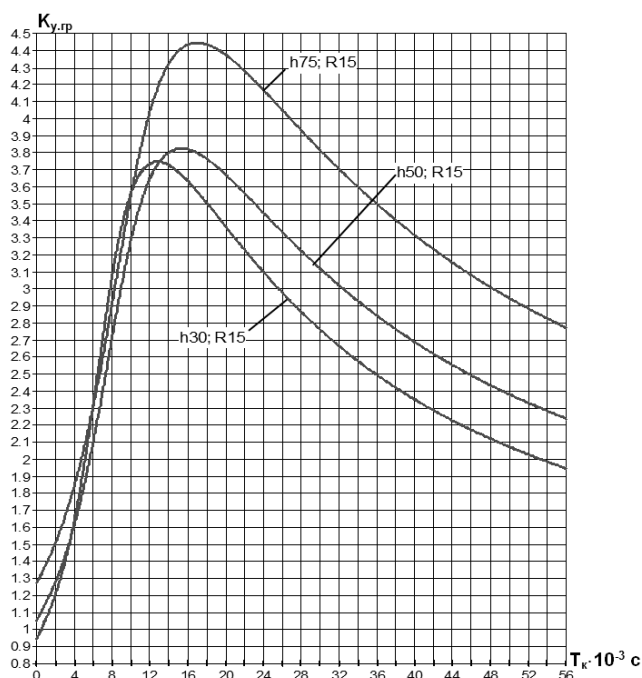


Рис. 3. Графики зависимостей граничного значения коэффициента усиления $K_{у.гр}$ от постоянной времени корректирующего звена T_k для $R = 15$ мм и $h30; 50; 75$ мм

Кроме того, построены графики зависимостей $T_{к.мах}(h)$ и $T_{к.мах}(R)$, а также графики зависимостей граничных (максимальных) значений коэффициента усиления $K_{у.гр}$ от $T_{к.мах}$ для различных h и R , из которых следует что с увеличением высоты (h) и уменьшением радиуса (R) величина $K_{у.гр}$ также возрастает. На рис. 4 и 5 приведены графики зависимостей $T_{к.мах}(h)$ и $T_{к.мах}(R)$, из которых видно, что с увеличением высоты h и наружного радиуса R обмотки соленоида, величина максимальной постоянной времени $T_{к.мах}$, соответствующая границе области устойчивости увеличивается.

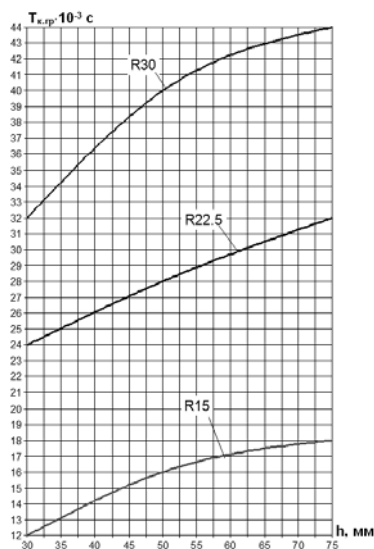


Рис. 4. Графики зависимостей значений постоянной времени корректирующего звена $T_{k.gr}$ определяющих границу области устойчивости по коэффициенту усиления электронного усилителя, от высоты обмотки соленоида для различных $R15; 22.5; 30 \text{ мм}$

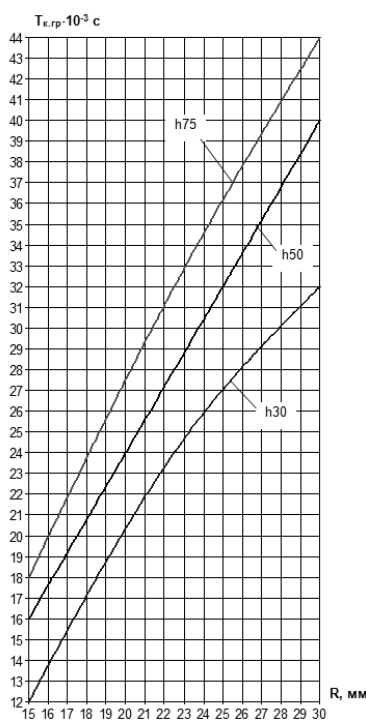


Рис. 5. Графики зависимостей значений постоянной времени корректирующего звена $T_{k.gr}$ определяющих границу области устойчивости по коэффициенту усиления электронного усилителя, от наружного радиуса обмотки соленоида для различных $h30; 50; 75 \text{ мм}$

На рис. 6 приведены графики зависимостей граничных (максимальных) значений коэффициента усиления $K_{y,гр}$ от $T_{к,мах}$ для различных h и R , из которых следует что с увеличением высоты h и уменьшением радиуса R величина $K_{y,гр}$ также возрастает. Причем при фиксированных размерах радиуса $R=22.5$; 30 мм величина коэффициента $K_{y,гр}(T_k)$, определяющего границу области устойчивости практически слабо зависит от высоты h в пределах $h=30$ до $h=50$, но с уменьшением радиуса R до значения $R=15$ и с ростом высоты обмотки h величина коэффициента $K_{y,гр}$ значительно возрастает (рис. 6).

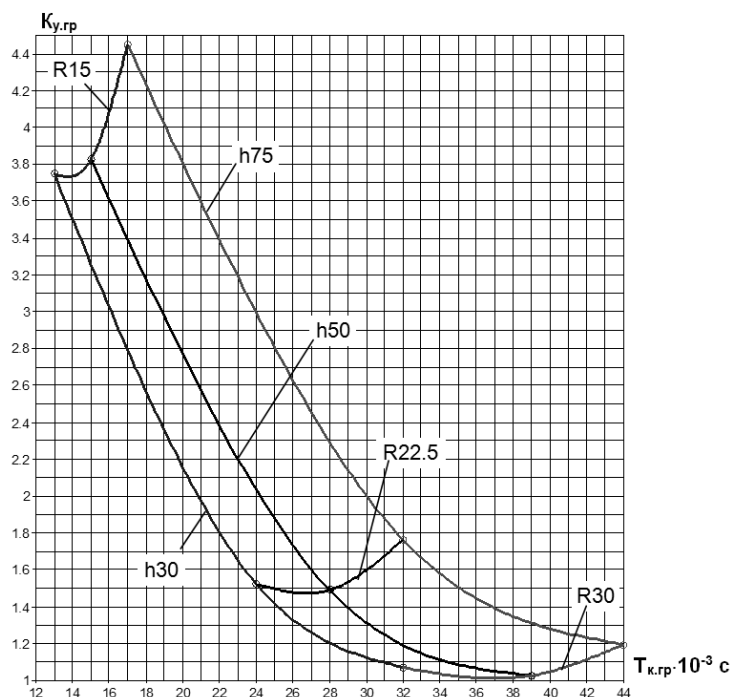


Рис. 6. Графики зависимостей границы области устойчивости по коэффициенту усиления $K_{y,гр}$ электронного усилителя от наружных радиусов $R=15$; 22.5; 30 мм и высот $h=30$; 50; 75 мм соленоида

На рис. 7 построены графики зависимости граничных (максимальных) значений передаточного коэффициента $K_{гр,мах}(T_{к,мах})$ участка разомкнутой цепи СМЛ от постоянной времени $T_{к,мах}$ корректирующего звена для различных R и h , откуда следует, что граница области устойчивости для указанных диапазонов R и h являются монотонно-убывающими функциями $K_{гр}(T_k)$, изменяющимися примерно по гиперболическому закону.

Полученные теоретические зависимости позволили установить оптимальный режим работы СМЛ, основанный на обеспечении устойчивости и стабильности динамически скорректированной системы, что является важной предпосылкой для обеспечения надлежащих метрологических характеристик различных приборов магнитолевитационного типа. Следует отметить, что результаты проведенных исследований разработанной СМЛ дают возможность наиболее рациональным образом выбрать основные статические и динамические параметры системы.

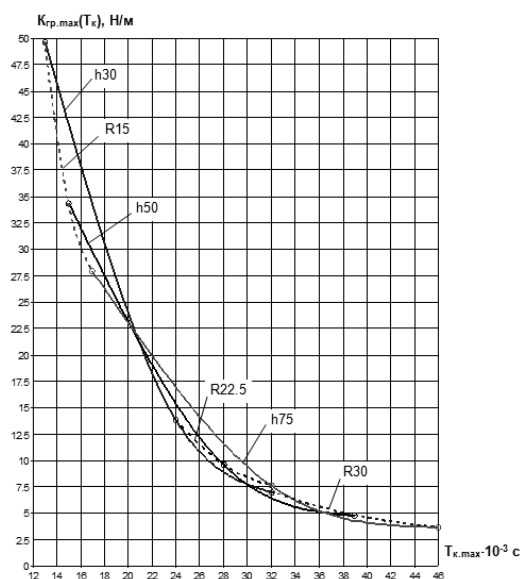


Рис. 7. Графики зависимостей граничных (максимальных) значений передаточного коэффициента усиления $K_{гр.мах}(T_{к.мах})$ участка разомкнутой цепи СМЛ от постоянной времени T_k корректирующего звена для $R15$; 22.5 ; 30 мм и $h30$; 50 ; 75 мм

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кацнельсон О.Г., Эдельштейн А.С. Магнитная подвеска в приборостроении. – М.: Энергия, 1966.
2. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Книга 2. Анализ и синтез линейных непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования. Колл. Авторы / Под. редакцией В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1967. – 682 с.
3. Пашаев А.М., Эфендиев О.З., Шахматов И.Е., Азизов Р.Р. Определение динамических показателей качества системы магнитной левитации // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 11.
4. Пашаев А.М., Эфендиев О.З., Шахматов И.Е. Математическая модель системы магнитной левитации и исследование ее на устойчивость // Ученые Записки. – 2004. – Т. 6, № 1.
5. Пашаев А.М., Эфендиев О.З., Шахматов И.Е., Азизов Р.Р. Математическая модель скорректированной системы магнитной левитации // Контроль. Диагностика. – М., 2004. – № 10.
6. Пашаев А.М., Эфендиев О.З., Нəбиєв Р.Н., Шүкүров С.А., Вəлиуєв С.М. Магнит асқının çıхış сiqналінің һолл вєricisi ilə içlik arasında olan мəsafədən аsılılıđı. Милли Авиасийа Академийасының Елми ясарлары, 2006-жи ил, № 2, сящ. 3-11.
7. Шахматов Е.П., Эфендиев О.З., Бабаев М.А., Набиев Р.Н. Весовой топливомер для аэродромных резервуаров на принципе магнитной левитации. Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi əsərləri, № 2, 2002-ci il, səh. 79-81.
8. Пашаев А.М., Эфендиев О.З. Теория и практика магнитной левитации в приборостроении. – М.: Машиностроение, 2009. – 335 с.
9. Эфендиев О.З., Əзизов Р.Р., Мəммədov А.З. Vertikal sürəti ölçən магнит левитасийа системинин riyazi modeli və elektромагнит dempferləyici бəndin сəғəyan gücləndiricisinin ötürmə əmsalı K_s → görə dayanıqlıq oblastının qurulması. Azərbaycan Texniki Universitetinin 60 illik yubileyinə həsr olunmuş “Təhsildə və elmdə innovasiya texnologiyaları” Respublika Elmi – Praktiki Konfransının Materialları. – Bakı, 2011. – Səh. 78-82.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Набиев Расим Насиб оглы – Национальная академия авиации Азербайджана (г. Баку); e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; AZ1045, г. Baki, pos. Bina, 25 km.; д.т.н.; начальник отдела Авиационной электроники НИИ ТАП.

Бадалов Ариф Зейнал оглы – e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; д.т.н.

Маедов Афтандил Зака оглы – e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; д.т.н.

Nabiev Rasim Nasib Ogli – National Aviation Academy of Azerbaijan (Baku city); e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; AZ1045, Baku city, Pos Bina; dr. of eng. sc.; chief of Electronic Aviation National Aviation Academy of Azerbaijan.

Badalov Arif Zainal Ogli – e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; dr. of eng. sc.

Mamedov Aftandil Zaka Ogli – e-mail: rasimnabiyev@yahoo.com; dr. of eng. sc.

УДК 620.97

И.С. Коберси, Н.А. Фиров, Д.А. Сахно

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЛЕРА ЗАРЯДА-РАЗРЯДА ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрены две существующие схемы контроллера заряда-разряда для ветроэнергетических систем. Для повышения функционала существующих схем предложено разработать контроллер, позволяющий вывести одиночные ветрогенераторы с локального уровня на уровень системы, объединенной в подстанции. Также в работе предложена новая структура построения распределенной системы резервирования и передачи электроэнергии между подстанциями и потребителями. Приводятся примеры электрических схем контроллера заряда, а также желаемый алгоритм работы контроллера с возможностью использования основного и резервного аккумуляторов.

Ветроэнергетика; система распределения электроэнергии; контроллер заряда-разряда; блок регулирования потребления электроэнергии.

I.S. Kobersi, N.A. Firov, D.A. Sahno

DEVELOPMENT OF CHARGE CONTROLLERS FOR WIND ENERGY SYSTEMS

This article describes the two existing schemes Charge Controllers for wind energy systems. To increase the functionality of existing schemes, it is proposed to develop a controller which enables to deduce single wind turbines from local levels to the level of the system, combined in the substation. Also in the proposed new structure of the distributed system backup and transmission of electricity between substations and consumers. Examples of charge controller electric circuits are given and desirable operating algorithm for controller providing applying of the main and redundant batteries is introduced.

Wind power; power distribution systems; charge controllers; power consumption control.

Введение. При современных условиях на рынке электроэнергии, получаемую от электростанции энергию, а также их негативного влияния на окружающую среду всё чаще встает вопрос о выборе альтернативных источников энергии. Одной из перспективных альтернатив является ветроэнергетические установки [1].

Популярность ветровых установок на российском рынке пока еще не высока, но с каждым годом уверенно растет. Их использование позволит снизить расход исчерпываемых энергоресурсов, таких как нефть, уголь и природный газ.