

УДК 629.42.053

В. В. БУРЧЕНКОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГОРОЧНОГО ТЕПЛОВОЗА

Разработана методика определения областей устойчивости замкнутой системы автоматического регулирования скорости горючего тепловоза путем D -разбиения по двум параметрам. Обоснована возможность выбора параметров регулятора скорости во взаимосвязи с областью устойчивости автоматической системы регулирования.

Комплексная система автоматического управления сортировочным процессом на станции (КСАУ СП) предусматривает использование нескольких систем и устройств, обеспечивающих высокий уровень автоматизации операций расформирования и формирования составов [1]. Одна из них – система автоматического управления горючим тепловозом (САУ ГТ) предназначена для регулирования скорости надвига и роспуска составов на сортировочных горках с высокой точностью. Алгоритм функционирования САУ ГТ предусматривает дискретное цифровое управление дизелем локомотива в сочетании с пропорционально-интегральным законом управления тяговым синхронным генератором СГ. Позиционное управление дизелем в системе САУ ГТ обеспечивает регулирование скорости движения локомотива с погрешностью, составляющей 8–12 % от заданной скорости надвига и роспуска составов, при необходимости выполнения требования по этому показателю на уровне 5 % [2]. Точное поддержание заданной скорости движения v_r обеспечивается замкнутым контуром автоматического регулирования тока нагрузки тягового синхронного генератора СГ. Наличие обратной связи по v_r обуславливает исследование устойчивости этого контура регулирования.

Область устойчивости в плоскости двух параметров была впервые построена И. А. Вышнеградским при исследовании замкнутой системы автоматического регулирования (САР) третьего порядка. Применение критерия устойчивости Гурвица считается целесообразным, если характеристическое уравнение замкнутой системы имеет невысокий порядок, т. е. $n < 4$ [3]. В противном случае вычисления могут оказаться слишком сложными. При указанном порядке характеристического уравнения необходимое и достаточное условие устойчивости, связанное с положительностью всех определителей Гурвица, равнозначное условию, когда все коэффициенты характеристического уравнения и предпоследний определитель $\Delta_{n-1} = \Delta_n / a_n > 0$.

Область устойчивости на плоскости двух параметров может располагаться только внутри области, где все коэффициенты характеристического уравнения положительны. Из всех границ последней только две, определяемые равенствами $a_0 = 0$; $a_n = 0$, могут быть одновременно границами области устойчивости. Приведенные уравнения характеризуют аperiодические границы устойчивости.

Критерием Михайлова можно пользоваться при любом порядке характеристического уравнения. Если система находится на границе устойчивости, то годограф

Михайлова $D(j\omega)$ проходит через начало координат, что может быть отображено уравнением

$$D(j\omega) = u(\omega) + jv(\omega) = 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) имеет место при частоте, соответствующей прохождению характеристической кривой $D(j\omega)$ через начало координат, если вещественная $u(\omega)$ и мнимая $jv(\omega)$ части приравнены к нулю. Существование уравнения (1) свидетельствует о наличии в характеристическом уравнении замкнутой системы по крайней мере либо одного нулевого вещественного корня, либо пары сопряженных мнимых корней.

Рассмотренные критерии позволяют судить об устойчивости САР при заданных значениях ее параметров. Однако при проектировании САУ ГТ возникает задача, когда несколько параметров САР тягового генератора СГ целесообразно изменять в определенных пределах, чтобы обеспечить не только устойчивость системы, но и заданные ее качественные показатели.

Полагаем, что в коэффициенты характеристического уравнения входят два параметра – A и B , влияние которых на устойчивость должно быть оценено построением области устойчивости. В этом случае уравнение (1) может быть записано в виде

$$D(j\omega, A, B) = u(\omega, A, B) + jv(\omega, A, B) = 0, \quad (2)$$

$$\text{где } u(\omega, A, B) = 0; v(\omega, A, B) = 0. \quad (3)$$

Уравнения (3) позволяют разбить плоскость параметров A и B на ряд областей с определенным распределением корней характеристического уравнения и выделить среди них область устойчивости.

Для построения областей устойчивости возможно применение методики D -разбиения плоскости параметров, разработанной Ю. И. Неймарком [3]. Допустим, частота ω_1 и параметры A_1 и B_1 удовлетворяют уравнениям (3) и, следовательно, соответствуют прохождению характеристической кривой через начало координат. Если частота изменилась и стала равной ω_2 , то для соблюдения условий (3) необходимо, чтобы и параметры приняли новые значения: A_2 и B_2 . Таким образом, изменяя частоту ω от $-\infty$ до $+\infty$ при удовлетворении уравнений (3), можно получить диапазон изменения значений параметров A и B , соответствующий границе устойчивости.

Решая уравнения (3) относительно A и B , получим выражения

$$A = f_1(\omega); B = f_2(\omega), \quad (4)$$

по которым можно построить кривую D -разбиения в плоскости двух параметров, где по одной из осей координат откладывается значение параметра A , а по другой – значение параметра B .

Если решение уравнений (3) удалось получить в виде (4), то процесс построения кривой достаточно прост. Задавая различные значения частоте ω и вычисляя параметры A и B по формулам (4), на плоскости двух параметров осуществляют построение точек с координатами $(A; B)$.

Иначе говоря, построение кривой D -разбиения связано с исключением частоты из уравнений (4) и получением выражения, устанавливающего связь между параметрами A и B .

Если между параметрами A и B и действительной u и мнимой v частями уравнения (2) существует линейная зависимость, то выражения типа (4), необходимые для построения кривой D -разбиения, могут быть записаны в виде

$$\left. \begin{aligned} u(\omega, A, B) &= AP_1(\omega) + BQ_1(\omega) + R_1(\omega) = 0; \\ v(\omega, A, B) &= AP_2(\omega) + BQ_2(\omega) + R_2(\omega) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

После решения (5) относительно A и B получим

$$A = \frac{Q_1 R_2 - Q_2 R_1}{P_1 Q_2 - Q_1 P_2} = \frac{\Delta a}{\Delta}; \quad B = \frac{P_2 R_1 - R_2 P_1}{P_1 Q_2 - Q_1 P_2} = \frac{\Delta b}{\Delta}, \quad (6)$$

где

$$\Delta a = \begin{vmatrix} -R_1 & Q_1 \\ -R_2 & Q_2 \end{vmatrix}; \quad \Delta b = \begin{vmatrix} P_1 & -R_1 \\ P_2 & -R_2 \end{vmatrix}; \quad \Delta = \begin{vmatrix} P_1 & Q_1 \\ P_2 & Q_2 \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) позволяют построить кривую D -разбиения.

Так как функции $P_2(\omega)$, $Q_2(\omega)$ и $R_2(\omega)$ являются нечетными функциями от ω , а $P_1(\omega)$, $Q_1(\omega)$ и $R_1(\omega)$ – четными, то в числителе и знаменателе выражений (6) и (7) частоту ω можно вынести за скобки.

В связи с этим при $\omega = 0$ параметры A и B принимают неопределенное значение $0/0$. Этот случай соответствует особой прямой.

Уравнение второй особой прямой может быть легко получено из системы уравнений (5)

$$AP_1(0) + BQ_1(0) + R_1(0) = 0. \quad (8)$$

Уравнение (8) соответствует свободному члену в характеристическом уравнении, равному нулю, т. е. $a_n = 0$. Особая прямая для случая $\omega = 0$ соответствует переходу одного корня через мнимую ось в начале координат.

Из структурной схемы САУ ГТ видно, что в системе автоматического регулирования генератора использован замкнутый контур регулирования тока возбуждения тягового генератора с коэффициентом усиления регулятора K_5 и постоянной времени T_2 , реализующий пропорционально-интегральный закон управления [2].

Прежде чем исследовать влияние коэффициентов K_5 и T_2 на качество регулирования, необходимо выяснить диапазон изменения этих параметров, при которых си-

стема управления скоростью локомотива остается устойчивой.

Используя дифференциальные уравнения и передаточные функции элементов контура регулирования тока тягового генератора [2], целесообразно решать поставленную задачу методом D -разбиения по параметрам K_5 и T_2 . Преимущество этого метода перед другими заключается в возможности выбрать величины этих параметров при уже заданных значениях остальных параметров системы [3].

Характеристическое уравнение третьего порядка контура регулирования СГ получено при следующих допущениях: не учитывается постоянная времени тяговых электродвигателей ТЭД, ввиду ее незначительности по сравнению с постоянной времени локомотива с составом T_c ; передаточная функция состава представлена апериодическим звеном первого порядка с коэффициентом усиления K_c [4].

$$T_2 T_c T_{об} s^3 + T_2 T_{об} s^2 + T_2 T_c s + T_2 s + K_5 T_2 K_{об} K_r K_c s + K_{об} K_r K_c = 0, \quad (9)$$

где $T_{об}$ и $K_{об}$ – постоянная времени и коэффициент усиления обмотки возбуждения генератора СГ; K_r – коэффициент усиления генератора СГ; s – оператор преобразования Лапласа.

Обозначив исследуемые параметры T_2 и K_5 соответственно, через λ_1 и λ_2 и осуществив подстановку $s = j\omega$, уравнение (4) может быть записано в виде двух уравнений

$$-\lambda_1 T_c T_{об} \omega^3 + \lambda_1 \omega + \lambda_1 \lambda_2 K_{об} K_r K_c \omega = 0; \quad (10)$$

$$-\lambda_1 T_{об} \omega^2 - \lambda_1 T_c \omega^2 + K_{об} K_r K_c = 0. \quad (11)$$

При сокращении уравнения (10) на $\lambda_1 \omega$ и анализе оставшегося выражения

$$-T_c T_{об} \omega^2 + 1 + \lambda_2 K_{об} K_r K_c = 0 \quad (12)$$

видно, что при $\omega = 0$ имеет место особая прямая

$$\lambda_2 = -\frac{1}{K_{об} K_r K_c}. \quad (13)$$

Из уравнения (11) следует, что

$$\lambda_1 = -\frac{\omega^2 (T_{об} + T_c)}{K_{об} K_r K_c}, \quad (14)$$

из которого при $\omega = \infty$ получим уравнение второй особой прямой

$$\lambda_1 = 0. \quad (15)$$

Полученные уравнения (12)–(15) дают возможность определить область устойчивости в координатах λ_1 и λ_2 при различных значениях T_c и K_c .

Существенно уменьшить объем расчетов позволяет характеристика зависимости коэффициента усиления локомотива с составом K_c от постоянной времени T_c $K_c = f(T_c)$, имеющая вид экспоненциальной кривой [4]. При использовании этой характеристики и численных

значений параметров контура регулирования ($T_{об} = 1,2$ с, $K_{об} = 2,06$, $K_r = 8,75$) осуществлены расчеты λ_1 и λ_2 с изменением T_c от 160 до 10 с при соответствующем изменении K_c от 0,06 до 0,75 с дискретностью $\Delta T_c = 20$ с.

В выражениях (12)–(14) аргумент ω представлен его квадратом ω^2 , вследствие чего часть кривой D -разбиения при изменении ω от $-\infty$ до нуля совпадает с другой ее частью при изменении ω от нуля до $+\infty$. Результаты вычислений сведены в таблицу 1, на основании которой построен график границы устойчивости, показанный на рисунке 1.

Таблица 1 – Результаты расчета

T_c, c	160		80		10	
ω	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2
$+\infty$	0	∞	0	∞	0	∞
500	$2,67 \cdot 10^{-8}$	$4,42 \cdot 10^7$	$8,86 \cdot 10^{-8}$	$1,31 \cdot 10^{-7}$	$4,82 \cdot 10^{-6}$	$2,25 \cdot 10^2$
100	$6,71 \cdot 10^{-7}$	$1,77 \cdot 10^6$	$2,21 \cdot 10^{-6}$	$5,29 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$8,94 \cdot 10^1$
10	$6,70 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^4$	$2,21 \cdot 10^{-4}$	$5,29 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	89,40
1	$6,71 \cdot 10^{-3}$	176,80	$2,21 \cdot 10^{-2}$	52,85	1,20	0,82
0,5	$2,59 \cdot 10^{-2}$	43,53	$8,86 \cdot 10^{-2}$	12,77	4,83	0,15
0,1	$6,70 \cdot 10^{-1}$	0,85	2,21	$1,73 \cdot 10^{-2}$	180,50	-0,061
0,01	66,95	-0,90	221,6	-0,54	$1,2 \cdot 10^4$	-0,069
0,001	66,99	-0,91	22167	-0,55	$1,2 \cdot 10^6$	-0,070
0	∞	-0,92	∞	-0,55	∞	-0,070

Для повышения наглядности оси координат λ_1 и λ_2 представлены в логарифмическом масштабе. Из анализа рисунка следует, что кривая D -разбиения асимптотически сближается с особыми прямыми.

Соблюдая правила штриховки, нужно особую прямую $\lambda_1 = 0$ заштриховать однократно справа, а особую прямую $\lambda_2 = -0,92$ – однократно сверху. Границы D -разбиения отмечаются двойной штриховкой, направленной внутрь области устойчивости. Образовавшаяся замкнутая зона, приведенная на рисунке 1, является областью устойчивости.

Характер изменения D -образования в первом квадранте показывает, что область устойчивости системы практически не зависит от изменения величины параметра T_c , различие проявляется лишь в четвертом квадранте. Увеличение коэффициента λ_2 вызывает необходимость уменьшения коэффициента λ_1 и при расчетном значении λ_2 , равном 1,25, величина λ_1 не должна превышать 0,16 с.

Получено 20.01.2019

V. V. Burchankou. Determination of controller parameters speed hump locomotive.

The method of determination of stability areas of the closed system of automatic control of the speed of a diesel locomotive by D -partitioning on two parameters is developed. The possibility of choosing the parameters of the speed controller in connection with the stability of the automatic control system is substantiated.

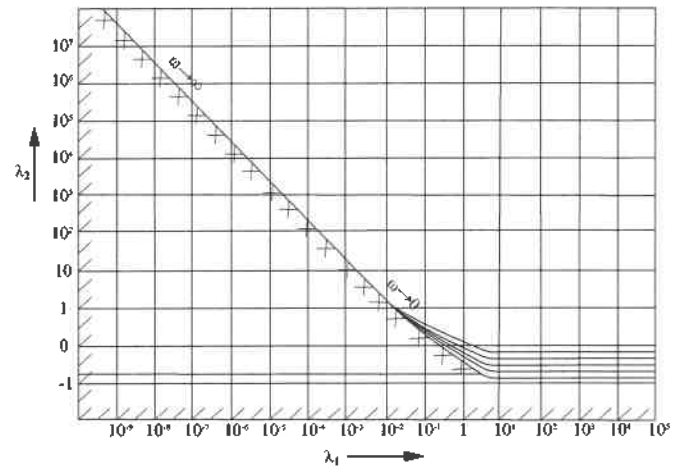


Рисунок 1 – График границы устойчивости САУ СГ

Заключение. Приведенная расчетная зависимость D -образования позволяет эффективно решать задачу выбора параметров регулятора K_5 и T_2 в условиях обеспечения устойчивой работы САУ ГТ и переменных значений K_c и T_c , характерных для процесса расформирования составов, с уменьшением T_c от максимального значения в начале роспуска до минимального, равного постоянной времени локомотива.

Список литературы

- 1 Гапанович, В. А. Системы безопасности в управлении технологическим процессом сортировочных станций / В. А. Гапанович, А. Н. Шабельников // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 11. – С. 2–5.
- 2 Бурченков, В. В. Совершенствование характеристик системы автоматического регулирования скорости горочного тепловоза / В. В. Бурченков // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2018. – № 1 (36) – С. 13–16.
- 3 Воронов, А. А. Основы теории автоматического регулирования и управления / А.А. Воронов, В. К. Титов, Б. Н. Виноградов. – М.: Высш. шк. 1977. – 519 с.
- 4 Бурченков, В. В. Система автоматического управления горочным тепловозом с электрической передачей: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / В. В. Бурченков, ВНИИЖТ. – М., 1985. – 24 с.