

Т. Е. АЛЕКСАНДРОВА, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

ЦИФРОВОЙ СТАБИЛИЗАТОР ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА ТАНКОВОГО ПРИЦЕЛА-ДАЛЬНОМЕРА

Показано, что в развитии систем управления огнем современных танков прослеживается тенденция перехода от стабилизаторов лазерного луча прицела-дальномера силового типа к стабилизаторам индикаторного типа. Исследованы процессы стабилизации лазерного луча танкового прицела-дальномера при использовании цифрового стабилизатора индикаторного типа с цифровыми низкочастотными фильтрами. Показано, что наилучшая помехозащищенность замкнутой системы стабилизации может быть достигнута использованием цифровых фильтров Баттеруорта и Ланцоша, функционирующих по последовательно-параллельной схеме.

Ключевые слова: танковый прицел-дальномер, цифровой стабилизатор, низкочастотные цифровые фильтры.

Введение. Системы управления огнем современных танков содержит лазерные прицелы-дальномеры, в которых направление лазерного луча определяет линию прицеливания, а лазерный луч стабилизируется относительно направления на цель. При силовой стабилизации лазерного луча ось головного подвижного зеркала прицела связана ленточной передачей с осью внешней рамки гиостабилизированной платформы. Так как оси рамок гиостабилизированной платформы сохраняют неизменное направление в пространстве, неизменное направление сохраняет и головное зеркало прицела, определяющее направление линии прицеливания [1, 2].

Проблема повышения точности стабилизации линии прицеливания актуальна потому, что в современных танковых комплексах управляемого вооружения наведение ракет осуществляется по лазерному лучу прицела-дальномера и точность такого комплекса напрямую зависит от точности стабилизации лазерного луча.

Целью настоящей работы является построение такого алгоритма стабилизации лазерного луча танкового прицела-дальномера, который обеспечивал бы необходимый уровень помехозащищенности, а следовательно, и точности системы стабилизации.

Основная часть. Для снижения уровня вибраций головного зеркала танкового прицела-дальномера в последние годы вместо систем силовой стабилизации переходят к системам индикаторной стабилизации, представляющих собой следящие системы передачи угла. Схема такой системы приведена на рис. 1, где приняты обозначения ПН – пульт наведения; ЭН – электромагнит наведения; ГСП – гиостабилизированная платформа; ВТ1, ВТ2 – вращающиеся трансформаторы; Р1, Р2 – роторы вращающихся трансформаторов; С1, С2 – статоры вращающихся трансформаторов; П1, П2 – потенциометры; ЦЭБ – цифровой электронный

блок; ИЭД – исполнительный электродвигатель; ШР – шестеренчатый редуктор; ПЗ, НЗ – соответственно подвижное и неподвижное зеркала прицела.

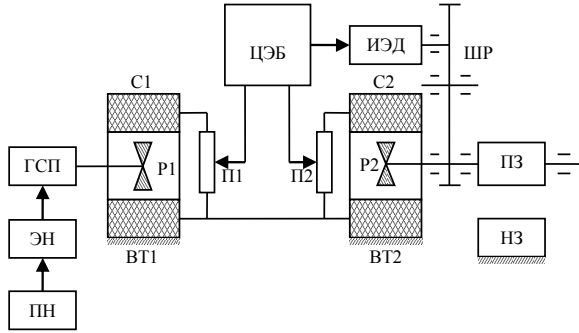


Рис. 1 – Индикаторный стабилизатор лазерного луча танкового прицела-дальномера

С выходов потенциометров П1 и П2 на входы цифрового электронного блока поступают сигналы переменного тока частотой 500 Гц, амплитуда которых пропорциональна углам поворота роторов P1 и P2 вращающихся трансформаторов относительно их статоров C1 и C2. В цифровом электронном блоке эти сигналы преобразуются в сигналы постоянного тока $u_1(t)$ и $u_2(t)$, а затем формируется их алгебраическая сумма

$$u_{\phi}(t) = u_1(t) + u_2(t), \quad (1)$$

которая подается на вход преобразователя «аналог-код», где преобразуется в решетчатую функцию $u_{\phi}[nT]$, где T – период дискретности ЦЭБ. На основании дискретного сигнала $u_{\phi}[nT]$ цифровой электронный блок формирует алгоритм стабилизации $\sigma[nT]$, подаваемый на вход преобразователя «код-аналог», с выхода которого сигнал управления $\sigma(t)$ подается на вход исполнительного электродвигателя, якорь которого через шестеренчатый редуктор связан с осью подвижного зеркала прицела. При повороте корпуса танка на угол $\phi_k(t)$ появляется угловое рассогласование между ротором P1, связанным с неподвижной в пространстве рамкой гиостабилизированной платформы, и статором C1, подвижно закрепленном на корпусе танка. Сигнал с выхода потенциометра П1 подается на вход цифрового электронного блока ЦЭБ, а с выхода ЦЭБ сигнал $\sigma(t)$ подается на вход исполнительного электродвигателя ИЭД, якорь которого через редуктор ШР передает вращение оси подвижного зеркала ПЗ, которое поворачивается на угол $\phi_3(t) = -\phi_k(t)$ в сторону противоположную повороту корпуса танка.

При этом изображение цели в неподвижном зеркале НЗ остается неподвижным.

В работе [3] авторами показано, что для повышения точности стабилизации лазерного луча танкового прицела-дальномера в алгоритме стабилизации необходимо использовать не только информацию о сигнале (1), но также информацию о производной этого сигнала по времени. Для аналоговой системы стабилизации такой алгоритм записывается в виде

$$\sigma(t) = k_{\varphi} u_{\varphi}(t) + k_{\dot{\varphi}} \dot{u}_{\varphi}(t), \quad (2)$$

где k_{φ} и $k_{\dot{\varphi}}$ - коэффициенты усиления аналогового стабилизатора.

Дифференцирование по времени зашумленного высокочастотной помехой сигнала $u_{\varphi}(t)$ приводит к возрастанию ошибки при определении функции $\sigma(t)$, иными словами, к снижению помехозащищенности системы стабилизации, что, в конечном итоге, приводит к снижению точности стабилизации лазерного луча.

В работе [4] предпринята попытка использовать аналогичный по структуре алгоритм стабилизации для цифрового электронного блока

$$\sigma[nT] = k_{\varphi} u_{\varphi}[nT] + \frac{k_{\dot{\varphi}}}{T} \{u_{\varphi}[nT] - u_{\varphi}[(n-1)T]\}, \quad (3)$$

Здесь же на качественном уровне показано, что алгоритм (3) не в состоянии обеспечить высокую помехозащищенность, а, следовательно, и точность цифровой системы стабилизации. Действительно, квантование по времени зашумленного высокочастотными помехами сигнала $u(t)$ приводит к снижению помехозащищенности системы, как и дифференцирование зашумленного сигнала $u(t)$.

В соответствии с работой [4], дискретная передаточная функция приведенной непрерывной части системы записывается

$$W_{\text{ппч}}(z) = \frac{z-1}{z} Z\{h_{\text{ппч}}[nT]\} = k_{\text{ппч}} \left\{ \frac{\left[T_{\text{д}} \left(e^{\frac{T}{T_{\text{д}}}} - 1 \right) + T \right] z - \left[T_{\text{д}} \left(e^{\frac{T}{T_{\text{д}}}} - 1 \right) + T e^{\frac{T}{T_{\text{д}}}} \right]}{\left(z - e^{-\frac{T}{T_{\text{д}}}} \right) (z-1)} \right\}. \quad (4)$$

Передаточную функцию ЦЭБ, с учетом соотношения (3), запишем в виде

$$W_{\text{эб}}(z) = k + \frac{k_{\dot{\varphi}}}{T} \cdot \frac{z-1}{z}. \quad (5)$$

Тогда характеристическое уравнение замкнутой цифровой системы стабилизации лазерного луча определяется соотношением

$$1 + W_{ЭБ}(z)W_{ПНЧ}(z) = 0. \quad (6)$$

Подставляя в (6) соотношения (4) и (5), получаем

$$z^3 - \left[a_3 - k_{ПНЧ} \left(k + \frac{k}{T} \right) a_1 \right] z^2 + \left[a_4 - k_{ПНЧ} \frac{k}{T} a_1 - k_{ПНЧ} \left(k + \frac{k}{T} \right) a_2 \right] z + k_{ПНЧ} \frac{k}{T} a_2 = 0, \quad (7)$$

где введены следующие обозначения:

$$a_1 = T_{Д} \left(e^{\frac{T}{T_{Д}}} - 1 \right) + T; \quad a_2 = T_{Д} \left(e^{\frac{T}{T_{Д}}} - 1 \right) + T e^{\frac{T}{T_{Д}}}; \quad a_3 = e^{\frac{T}{T_{Д}}} + 1; \quad a_4 = e^{\frac{T}{T_{Д}}}.$$

Величина коэффициента усиления непрерывной части системы $k_{ПНЧ}$ отрицательна, в связи с тем, что поворот подрессоренной части корпуса танка, на которой установлен прицел танковой пушки, на некоторый угол $\varphi_k(t)$ вызывает поворот головного зеркала прицела в противоположную сторону на угол $\varphi_3(t) = -\varphi_k(t)$, с целью сохранения неизменного направления в пространстве линии прицеливания.

Связь между комплексными переменными s и z соответственно преобразования Лапласа и Z -преобразования определяются формулой [6]

$$z = e^{sT}. \quad (8)$$

В формуле (8) произведем замену $s = j\omega$. В результате получаем:

$$\begin{aligned} z &= e^{j\omega T} = \cos \omega T + j \sin \omega T; \\ z^2 &= e^{2j\omega T} = \cos 2\omega T + j \sin 2\omega T; \\ z^3 &= e^{3j\omega T} = \cos 3\omega T + j \sin 3\omega T. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставим соотношения (9) в характеристическое уравнение (7), выделим действительную и мнимую части и приравняем их нулю. В результате получаем два линейных алгебраических уравнения относительно варьируемых констант k_{φ} и $k_{\dot{\varphi}}$:

$$\begin{aligned} k_{\varphi} A(\omega T) + k_{\dot{\varphi}} B(\omega T) &= C(\omega T); \\ k_{\varphi} D(\omega T) + k_{\dot{\varphi}} E(\omega T) &= F(\omega T), \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned}
A(\omega T) &= -k_{\text{НЧ}} \cos 2\omega T + k_{\text{НЧ}} \cos \omega T; \\
B(\omega T) &= -k_{\text{НЧ}} \frac{a_1}{T} \cos 2\omega T + k_{\text{НЧ}} \frac{a_1 + a_2}{T} \cos \omega T - k_{\text{НЧ}} \frac{a_2}{T}; \\
C(\omega T) &= -\cos 3\omega T + a_3 \cos 2\omega T - a_4 \cos \omega T; \\
D(\omega T) &= -k_{\text{НЧ}} \sin 2\omega T + k_{\text{НЧ}} \sin \omega T; \\
E(\omega T) &= -k_{\text{НЧ}} \frac{a_1}{T} \sin 2\omega T + k_{\text{НЧ}} \frac{a_1 + a_2}{T} \sin \omega T; \\
F(\omega T) &= -\sin 3\omega T + a_3 \sin 2\omega T - a_4 \sin \omega T.
\end{aligned}$$

Решения системы (10) определяется соотношениями:

$$\begin{aligned}
k_{\phi} &= \frac{C(\omega T)E(\omega T) - F(\omega T)B(\omega T)}{A(\omega T)E(\omega T) - D(\omega T)B(\omega T)}; \\
k_{\phi} &= \frac{A(\omega T)F(\omega T) - D(\omega T)C(\omega T)}{A(\omega T)E(\omega T) - D(\omega T)B(\omega T)}.
\end{aligned} \tag{11}$$

С помощью соотношений (11) в плоскости варьируемых параметров k_{ϕ} , k_{ϕ} построим область устойчивости замкнутой системы стабилизации, представленную на рис. 2. Значения параметров стабилизатора при этом принимаются равными $k_{\text{НЧ}} = -1$; $T_{\text{д}} = 0,2\text{с}$; $T = 0,01\text{с}$.

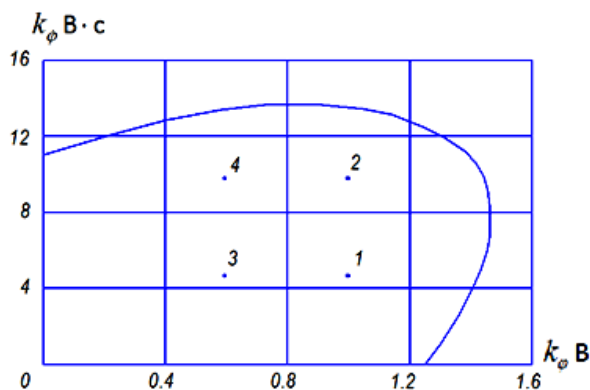


Рис. 2 – Область устойчивости замкнутой системы стабилизации

Рассмотрим дискретную передаточную функцию замкнутой системы стабилизации линии прицеливания

$$W(z) = \frac{W_{\text{ПНЧ}}(z)}{1 + W_{\text{ЭБ}}(z)W_{\text{ПНЧ}}(z)}. \quad (12)$$

С учетом соотношений (9) формула (12) принимает вид

$$\begin{aligned} W(j\omega T) &= \frac{k_{\text{ПНЧ}} [P(\omega T) + jQ(\omega T)]}{R(\omega T) + jS(\omega T)} = \\ &= k_{\text{ПНЧ}} \left\{ \frac{P(\omega T)R(\omega T) + Q(\omega T)S(\omega T)}{R^2(\omega T) + S^2(\omega T)} + j \frac{R(\omega T)Q(\omega T) - P(\omega T)S(\omega T)}{R^2(\omega T) + S^2(\omega T)} \right\}, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} P(\omega T) &= a_1 \cos 2\omega T - a_2 \cos \omega T; \\ Q(\omega T) &= a_1 \sin 2\omega T - a_2 \sin \omega T; \\ R(\omega T) &= -C(\omega T) + k_{\phi} A(\omega T) + k_{\phi} B(\omega T); \\ S(\omega T) &= -F(\omega T) + k_{\phi} D(\omega T) + k_{\phi} E(\omega T). \end{aligned}$$

Используя формулу (13), запишем соотношения для расчета АЧХ и ФЧХ цифрового стабилизатора

$$M(\omega T) = |k_{\text{ПНЧ}}| \sqrt{\frac{P^2(\omega T) + Q^2(\omega T)}{R^2(\omega T) + S^2(\omega T)}}; \quad (14)$$

$$\Psi(\omega T) = \arctg \frac{P(\omega T)Q(\omega T) + P(\omega T)S(\omega T)}{|P(\omega T)R(\omega T) + Q(\omega T)S(\omega T)|}. \quad (15)$$

На рисунке 3 приведены АЧХ (сплошные линии) и ФЧХ (пунктирные линии) замкнутой цифровой системы стабилизации, соответствующие точкам 1, 2, 3 и 4 области устойчивости, приведенной на рис. 2. Анализ этих характеристик позволяет сделать вывод, что использование алгоритма стабилизации (3) с передаточной функцией (5) приводит к значительным искажениям передаваемого сигнала цифровой следящей системы передачи угла, а именно, к подавлению амплитуд в области рабочих частот и к значительному фазовому запаздыванию передаваемого сигнала в области рабочих частот. Иными словами, использование алгоритма (3) не приводит к подавлению высокочастотных шумов в спектре передаваемого сигнала, а приводит только к недопустимым искажениям сигнала в области рабочих частот. Для уменьшения этих искажений требуется значительное усложнение алгоритма стабилизации (3) путем использования цифровых низкочастотных фильтров [7, 8].

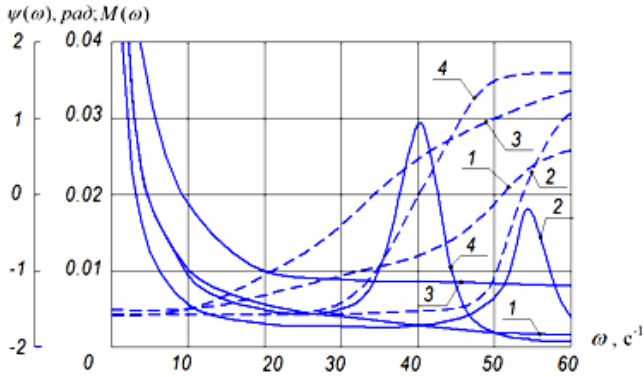


Рис. 3 – АЧХ и ФЧХ замкнутой цифровой системы стабилизации

В работе [9] показано, что наиболее эффективным способом подавления высокочастотных помех и уменьшения искажений передаваемого следящей системой сигнала является использование в алгоритме стабилизации цифровых фильтров Баттеруорта и Ланцоша, функционирующих по последовательно-параллельной схеме.

Передаточная функция стабилизатора в этом случае записывается в виде

$$W_{ЭБ}(z) = k_{\phi} W_{Б}(z) [1 + k_{\phi} W_{Л}(z)] \quad (16)$$

где $W_{Б}$, $W_{Л}$ - передаточные функции фильтров Баттеруорта и Ланцоша.

Предположим, что в ЦЭБ используются фильтры Баттеруорта и Ланцоша второго порядка с передаточными функциями

$$W_{Б}(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}; \quad (17)$$

$$W_{Л}(z) = c_0 + c_1 z^{-1} - c_1 z^{-3} - c_0 z^{-4}. \quad (18)$$

Подставляя соотношения (17) и (18) в формулу (16), получаем

$$W_{ЭБ}(z) = \frac{k \{d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + k \cdot (f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} - f_2 z^{-4} - f_1 z^{-5} - f_0 z^{-6})\}}{1 + l_1 z^{-1} + l_2 z^{-2}}, \quad (19)$$

где $d_0 = \frac{a_0}{b_0}$; $d_1 = \frac{a_1}{b_0}$; $f_0 = \frac{a_0 c_0}{b_0}$; $f_1 = \frac{a_0 c_1 + a_1 c_0}{b_0}$; $f_2 = \frac{a_0 c_0 + a_1 c_1}{b_0}$; $l_1 = \frac{b_1}{b_0}$;

$$l_2 = \frac{b_2}{b_0}.$$

Передаточной функции (19) соответствует следующий алгоритм управления

$$\begin{aligned} \sigma[nT] = & k_{\varphi} \{d_0 u_{\varphi}[nT] + d_1 u_{\varphi}[(n-1)T] + d_0 u_{\varphi}[(n-2)T]\} + \\ & + k_{\varphi} \left\{ \begin{aligned} & f_0 u_{\varphi}[nT] + f_1 u_{\varphi}[(n-1)T] + f_2 u_{\varphi}[(n-2)T] - \\ & - f_2 u_{\varphi}[(n-4)T] - f_1 u_{\varphi}[(n-5)T] - f_0 u_{\varphi}[(n-6)T] \end{aligned} \right\} - \\ & - l_1 \sigma[(n-1)T] - l_2 \sigma[(n-2)T]. \end{aligned} \quad (20)$$

Алгоритм стабилизации (20) намного сложнее алгоритма (3). Рассмотрим характеристики цифрового стабилизатора, реализующего алгоритм (20), представленные на рисунке 4 для точек 1, 2 и 5 области устойчивости замкнутой системы стабилизации и для значений параметров фильтров Баттеруорта и Ланцоша, составляющих $a_0 = 0,08073$; $a_1 = 0,16147$; $b_0 = 1,48256$; $b_1 = 1,83854$; $b_2 = 0,67789$; $c_0 = 5$; $c_1 = 2,5$.

Анализ АЧХ и ФЧХ ЦЭБ позволяет сделать вывод о том, что соответствующим выбором значений параметров фильтров Баттеруорта и Ланцоша можно значительно «подправить» АЧХ и ФЧХ замкнутой цифровой системы стабилизации лазерного луча танкового прицела-дальномера, а именно, четко определить полосу пропускания полезного сигнала и до минимума свести фазовые искажения передаваемого сигнала.

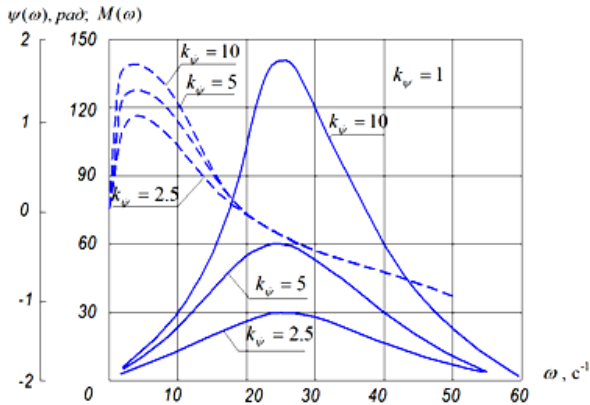


Рис. 4 – Частотные характеристики цифрового стабилизатора, реализующего алгоритм (20)

Выводы. Цифровой стабилизатор индикаторного типа лазерного луча танкового прицела-дальномера обеспечивает высокую точность стабилизации линии прицеливания и имеет высокую помехозащищенность только лишь при условии построения алгоритма стабилизации с использованием

низкочастотного фильтра Баттеруорта и дифференцирующего фильтра Ланцоша, соединенных по последовательно-параллельной схеме.

Список литературы: 1. Александров С. С. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Т.3. Авто-матичне керування озброєнням танків / С. С. Александров, О. К. Аблесімов, І. С. Александрова – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – 444с. 2. Александров Е. Е. Оценка точности стабилизации поля зрения прицела танковой пушки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2011. – № 3. – С. 48–51. 3. Александров Е. Е. Оценка точности электромеханического индикаторного стабилизатора поля зрения прибора наблюдения / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // Электромеханічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 3. – С. 339–341. 4. Александрова Т. Е. Структурно-параметрический синтез цифрового электромеханического стабилизатора поля зрения прибора наблюдения / Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко, А. В. Зейн // Электромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2012. – № 3. – С. 375–377. 5. Александров С. С. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. Т.1. Теорія автоматичного керування. / С. С. Александров, Е. П. Козлов, Б. І. Кузнецов – Харків : НТУ «ХПІ», 2002. – 490 с. 6. Джурі Э. Импульсные системы автоматического регулирования. / Э. Джурі – М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 455 с. 7. Хемминг Р. В. Цифровые фильтры. / Р. В. Хемминг – М. : Недра, 1984. – 221 с. 8. Ивашко А. В. Методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов. / А. В. Ивашко – Харьков : НТУ «ХПІ», 2005. – 240 с. 9. Александрова Т. Е. Сравнительный анализ цифровых ПД – стабилизаторов подвижных объектов с низкочастотными фильтрами Баттеруорта и Ланцоша / Т. Е. Александрова, В. А. Кононенко, А. А. Лазаренко, А. В. Зейн // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2011. – № 2. – С. 148–152.

Надійшла до редколегії 30.10.2013

УДК 621.11-32

Цифровой стабилизатор лазерного луча танкового прицела-дальномера / Т. Е. Александрова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 62 (1035). – С. 143–151. – Бібліогр.: 9 назв.

Показано, що в розвитку систем управління вогнем сучасних танків простежується тенденція переходу від стабілізаторів лазерного променя приціла-далекоміра силового типу до стабілізаторів індикаторного типу. Досліджено процеси стабілізації лазерного променя танкового прицілу-далекоміра при використанні цифрового стабілізатора індикаторного типу з цифровими низкочастотними фільтрами. Показано, що найкраща перешкодозахищеність замкнутої системи стабілізації може бути досягнута використанням цифрових фільтрів Баттеруорта і Ланцоша, що функціонують за послідовно-паралельною схемою.

Ключові слова: танковий приціл-далекомір, цифровий стабілізатор, низькочастотні цифрові фільтри.

The article is shown that in the development of fire control systems of modern tanks trend of transition from stabilizing laser rangefinder sight of the power type to a tracer-type stabilizers. The processes of stabilization of the laser beam tank rangefinder sight when using the digital indicator type stabilizer with digital low-frequency filters. It is shown that the best noise immunity of a closed system stabilization can be achieved by using digital filters Butterworth and Lanczos, operating on a series-parallel circuit.

Keywords: tank rangefinder sight, digital stabilizer, low-frequency digital filters.