

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-251-267

Семейство электронных стрелковых тренажёров «СТрИж»: уровни реализации и структура свободного программного обеспечения

С.Ф. Егоров

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 20.10.2023

Принята к печати 27.11.2023

Разработка стрелковых электронных тренажёров (т. е. для ручного оружия и не использующих боеприпасы) является важной задачей, т. к. производство любого вида стрелкового вооружения, согласно нормативным документам, требует и производства тренажёра для привития навыков прицеливания и стрельбы. Описано семейство электронных стрелковых тренажёров «СТрИж» четырёх уровней реализации: начального, базового, профессионального и специального. Приведены структурные схемы различных конфигураций, показано функциональное назначение и возможности каждого из уровней тренажёров. Начальный уровень позволяет самостоятельно собирать тренажёр из общедоступных элементов (ноутбук, веб-камера, макеты оружия, ИК-светодиоды), что может способствовать широкому применению как в школах, так и дома, но отличается низкой точностью и технологичностью (требует ежедневной тарировки). Базовый уровень также позволяет самостоятельно собирать тренажёр, но уже из менее общедоступных элементов (ноутбук, проектор, макет оружия, лазерные излучатели, FHD-камера), что позволяет применять его как в школах, так и в структурах ДОСААФ, имеет приемлемую точность и технологичность (достаточно еженедельной тарировки, но сборка макета оружия с лазерными излучателями требует юстировки). Специальный уровень рекомендуется ограничить тренажёрами виртуальной реальности, включающие шлем со смартфоном и макет оружия со своим смартфоном, что также способствует его общедоступности и широкому использованию. Алгоритм работы программного обеспечения тренажёра должен полностью поддерживать все уровни реализации с различными конфигурациями и включать мультимедийную систему обучения стрельбе. Подробно описаны математические модели внешней баллистики метаемого снаряжения для автомата Калашникова, пистолета Макарова, ручного противотанкового гранатомёта 7, учитывающие изменение атмосферных факторов (температуры, давления воздуха, силы ветра) и рассеивание различных типов боеприпасов. Приведённый обзор стрелковых тренажёров и опыта их эксплуатации выявил основные тенденции совершенствования – использование виртуальной реальности и тренировка не только навыков непосредственно стрельбы, но и обучение правомочности применения оружия, безопасного обращения с ним и даже тактическому взаимодействию в группе.

Ключевые слова: стрелковый тренажёр, точка прицеливания, внешняя баллистика, математическая модель, баллистическая траектория

Адрес для переписки:

Егоров С.Ф.

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, Ижевск 426067, Россия
e-mail: stos.mitm@mail.ru

Address for correspondence:

Egorov S.F.

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
e-mail: stos.mitm@mail.ru

Для цитирования:

С.Ф. Егоров.

Семейство электронных стрелковых тренажёров «СТрИж»: уровни реализации и структура свободного программного обеспечения. Приборы и методы измерений.

2023. Т. 14. № 4. С. 251–267.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-251-267

For citation:

Egorov S.F.

Electronic Shooting Simulator Family "STrIzh": Implementation Levels and Free Software Structure. *Devices and Methods of Measurements*.

2023;14(4):251–267. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-251-267

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-251-267

Electronic Shooting Simulator Family "STrIzh": Implementation Levels and Free Software Structure

S.F. Egorov

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 20.10.2023

Accepted for publication 27.11.2023

Abstract

Development of rifle electronic simulators (i.e. for hand weapons and not using ammunition) is an important task, since the production of any type of small arms according to regulatory documents also requires the production of a simulator to instill aiming and firing skills. A family of electronic shooting simulators "STrIzh" of four levels of implementation: initial, basic, professional and special is described. Structural diagrams of different configurations are given, functional purpose and capabilities of each level of simulators are shown. The initial level allows independent assemble the simulator from publicly available elements (laptop, webcam, weapon layouts, IR LEDs), which can contribute to widespread use both in schools and at home, but is low in accuracy and manufacturability (requires daily calibration). The basic level also allows independent assemble the simulator, and less publicly available elements (laptop, projector, mockup weapons, laser emitters, FHD camera), which allows to be used both in schools and in DOSAAF structures, and has acceptable accuracy and manufacturability (a weekly calibration is enough, but assembling a mock-up weapon with laser emitters requires adjustments). It is recommended to limit the special level to virtual reality simulators, including a helmet with a smartphone and a mockup of a weapon with its smartphone which also contributes to its public availability and widespread use. The simulator software algorithm should fully support all implementation levels with different configurations and include a multimedia shooting training system. Mathematical models of external ballistics of thrown equipment for Kalashnikov assault rifle, Makarov pistol, hand-held anti-tank grenade launcher 7 products are described in detail, taking into account changes in atmospheric factors (temperature, air pressure, wind force) and dispersion of various types of ammunition. The above review of rifle simulators and their experience revealed the main trends of improvement – use of virtual reality and training not only direct shooting skills, but also training in the eligibility of the use of weapons, safe handling of them and even tactical interaction in the group.

Keywords: shooting simulator, aiming point, external ballistics, mathematical model, ballistics trajectory

Адрес для переписки:

Егоров С.Ф.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, Ижевск 426067, Россия
e-mail: stos.mitm@mail.ru

Address for correspondence:

Egorov S.F.
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
e-mail: stos.mitm@mail.ru

Для цитирования:

С.Ф. Егоров.
Семейство электронных стрелковых тренажеров «СТрИж»: уровни реализации и структура свободного программного обеспечения. Приборы и методы измерений. 2023. Т. 14. № 4. С. 251–267.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-251-267

For citation:

Egorov SF.
Electronic Shooting Simulator Family "STrIzh": Implementation Levels and Free Software Structure. *Devices and Methods of Measurements*. 2023;14(4):251–267. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-251-267

Введение

Разработка стрелковых электронных тренажёров (т. е. для ручного оружия и не использующих боеприпасы) является важной задачей, т. к. производство любого вида стрелкового вооружения, согласно нормативным документам, требует производства тренажёра для привития навыков прицеливания и стрельбы. Электронный стрелковый тренажёр (СТ), безусловно, обладает большими возможностями и благодаря постоянному совершенствованию и удешевлению электронных компонент разработка структур тренажёров на общедоступных компонентах и программных библиотеках для их широкого использования является актуальной задачей, обладающей практической ценностью.

СТ является сложной программно-аппаратной информационно-измерительной системой взаимодействия с обучаемыми в процессе учебного упражнения (эксперимента) и адекватной реакции в реальном времени на все их действия как с имитатором оружия (ИО), так и косвенно с постоянно изменяемой мишенной обстановкой в заданных внешних условиях с моделированием процесса стрельбы и попадания.

Институт механики Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук и кафедра «Вычислительная техника» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова совместно с АО «Концерн «Калашников» (г. Ижевск) имеют длительный опыт разработки и модификации профессионального оптико-электронного стрелкового тренажёра «Ингибитор», принятого на вооружение под индексом 1У33.

С учётом опыта разработки, модификации и внедрения СТ «Ингибитор» [1] в 2010 г. автором были сформулированы пути дальнейшего развития стрелковых тренажёров [2]. В 2011 г. предложена структура тренажёра начального уровня [3] с общедоступным аналоговым регистратором точки прицеливания (РТПр) [4]. К 2014 г. исследованы математические модели (ММ) уже цифровых РТПр [5], к 2016 г. оптимизированы алгоритмы выделения точки прицеливания (ТПр) и испытана первичная модель баллистической траектории, учитывающая внешние факторы стрельбы.

К 2017 г. проанализирован широкий класс РТПр [6–7].

Зарубежные и отечественные проекты по разработке электронных стрелковых тренажёров в части математических моделей и даже многих технических характеристик являются коммерческой тайной – открытые исследования ведутся лишь в академической среде: в [8–10] представлены структуры СТ, в [11–15] проанализированы некоторые РТПр, в [16, 17] предложена конструкция ИО и обращение с ним, в [18–22] спрогнозированы перспективные исследования в области виртуальной реальности (ВР) для СТ.

Таким образом, необходима разработка структурных схем модульных тренажёров различных уровней реализации и назначения на базе научных подходов [23] и разработка общего для всех уровней свободно распространяемого программного обеспечения (ПО) для широкого внедрения самостоятельно собранных тренажёров из общедоступных компонентов (ноутбуков, веб-камер, фотоаппаратов, проекторов, лазерных излучателей, микроконтроллеров, макетов оружия и пр.) на базе предложенных и исследованных математических моделей и алгоритмов и объединение их в семейство на базе общего универсального ПО, например опираясь на [24]. Также актуальны разработка и исследование эффективных методик обучения на электронных стрелковых тренажёрах, особенно самостоятельных.

Целью первой статьи цикла является описание структурных схем тренажёров разрабатываемого семейства «СТрИж» нескольких уровней реализации с алгоритмами свободного ПО и математической моделью траектории внешней баллистики для распространенных видов вооружений. В дальнейших статьях цикла планируется описание математических моделей РТПр, конструкций ИО с контролем срыва крючка и с имитацией отдачи, а также описание конструкций и математических моделей СТ ВР.

Семейство тренажёров и структурные схемы

Сложность проектирования тренажёров для индивидуального стрелкового оружия носит системный характер: в отличие от тренажёров

технически сложного вооружения, которые делаются на базе кабины боевого образца (танка, самолёта и др.) на динамической платформе с эмуляцией тряски, отдачи и видеоизображениями мишенной обстановки со спецэффектами и получаются компактными и реалистичными, обеспечить полную свободу действий стрелка с ИО в окружении мишенной обстановки практически невозможно с таким же уровнем реалистичности. Поэтому приходится ограничиваться той или иной мерой условности с упором на широкое внедрение привития самых начальных навыков обращения с носимым оружием.

Семейство разрабатываемых и исследуемых СТ «СТрИж» подразделяется на четыре условных уровня: начальный (НУ), базовый (БУ), профессиональный (ПУ), специальный (СУ). Уровни отличаются конструкцией и точностью РТПр и реалистичностью ИО (особенно отдачей), а значит и ценой, техническими характеристиками, функциональными возможностями и, соответственно, сферами применения, но благодаря общему открытому ПО, реализующему все ММ, отличаются и высокой гибкостью конфигурации (т. е. не имеют

чётких границ уровней реализации). Самые главные техническими характеристиками СТ: среднеквадратическое отклонение (с.к.о.) σ погрешности определения координат ТПр (в тысячных дальности – т.д., 1 т.д. $\approx 0,0573^\circ \approx 3.448'$ угл. сек), частота в герцах опроса координат ТПр на рабочее место, реализация отдачи и датчиков ИО (срыв, свал, прицелы, магазин, предохранитель, затвор и др.).

Тренажёры начального уровня предназначены для широкого применения в школах и структурах ДОСААФ, отличаются низкой ценой и не очень высокой априорной точностью (0,6–1,5 т.д.) и быстродействием (15–60 Гц). РТПр НУ основан на принципе «излучатель на экране – приёмник на оружие», использует общедоступные стандартные компоненты (ноутбук, ИК-диоды, USB веб-камеры со светофильтром и с микрофоном, которой может быть подключён к спусковому крючку макета оружия). СТ НУ должен поддерживать как минимум ИО автомат Калашникова 74 (АК74) и пистолет Макарова (ПМ) без обязательной реализации отдачи (возможен вибромотор или пружина) в одноэкранной или двухэкранной конфигурации сборки СТ (рисунки 1, 2).

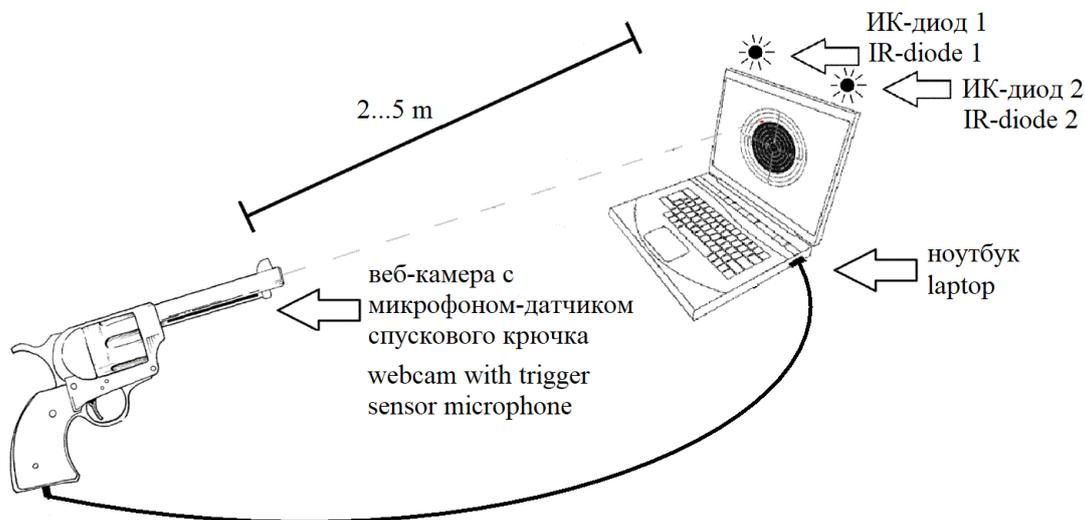


Рисунок 1 – Структура стрелкового тренажёра начального уровня в одноэкранной конфигурации

Figure 1 – Entry level Shooting Simulator structure in single-screen configuration

Для привития реалистичных навыков прицеливания, когда цель в фокусе, мушка в полуфокусе, а прорезь прицела размыта, необходимо расстояние не менее 5 м до экрана с мишенной обстановкой, но для СТ начального уровня

это не всегда возможно выполнить (поэтому математические модели РТПр НУ подстраивается под расстояние до экрана благодаря двум ИК-диодам, но ближе 2 м всё же тренироваться не рекомендуется). При приблизительной ширине

экрана 42 см на расстоянии 5 м до камеры получается угловой размер не менее 5° (на виртуальной дистанции 100 м имеем ширину участка имитируемой местности – далее фронт – 8 м). Это вполне позволяет реализовать на нём начальные и учебные упражнения Курса стрельб для одного рабочего места. Но РТПр НУ не накладывает ограничение на возможность

тренировки на нескольких рабочих местах одновременно и на использование проектора или широкоформатного телевизора вместо дисплея (монитора). Регистрация координат ТПр осуществляется непрерывно (и сохраняется в кольцевых буферах) для анализа совокупности ТПр, особенно непосредственно перед выстрелом и сразу после него.

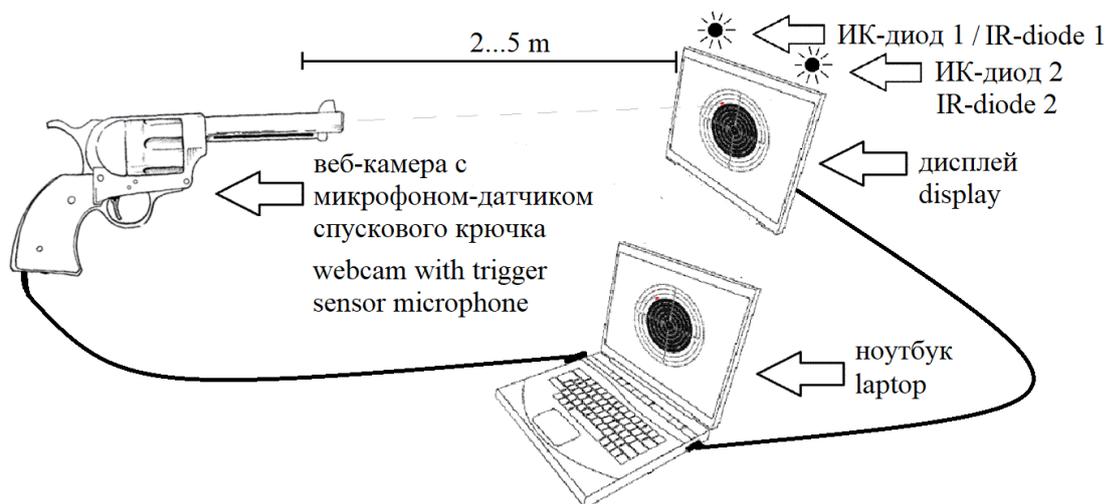


Рисунок 2 – Структура стрелкового тренажёра начального уровня в двухэкранный конфигурации

Figure 2 – Entry level Shooting Simulator structure in dual-screen configuration

Принцип работы РТПр НУ: изображения только двух инфракрасных (ИК)-диодов через светофильтр веб-камеры, размещенной на ИО, позволяют определить ТПр по ММ, заодно фиксируя свал оружия (недопустимый наклон в сторону) и, контролируя текущую дальность до экрана по расстоянию между ИК-диодами, позволяет всегда отображать истинные угловые размеры мишеней, но требуют ежедневной тарировки ММ (когда без изменения положения рабочего места осуществляется условная «стрельба» по нескольким фиксированным мишеням с указанием истинной дальности до экрана и расстояния между ИК-диодами). Микрофон веб-камеры может непосредственно улавливать звук курка как момент выстрела (если модель оружия позволяет, как например, у изделия «Макарыч»), а может быть подключён к кнопке на спусковом крючке оружия (как и рекомендуется). Остальные настройки ИО (прицельная планка, режим стрельбы и др.) чаще всего реализуются программно: так, «автоматическая» стрельба АК74 просто

генерирует «выстрелы» (10 выстр/сек), пока удерживается спусковой крючок. Отдача на ИО может быть реализована вибромотором на стволе, который по нажатию спускового крючка сбивает линию прицеливания, или механической пружиной.

Тренажёры базового уровня предназначены для широкого применения в специализированных кружках и структурах ДОСААФ (и даже МВД и МО), отличается средней ценой (ноутбук, проектор, ИК-лазеры, USB FHD-камера со светофильтром, USB АЦП-блоки для прицельной планки и спускового крючка), удовлетворительными априорной точностью (0,3–0,8 т.д.) и частотой опроса (30–120 Гц). РТПр БУ основан на принципе «излучатель на оружии – приёмник у экрана», использует стандартные компоненты, тренажёр имеет конфигурацию как с реализацией отдачи, так и без неё и должен поддерживать многие ИО из набора АК, ПМ, ручного пулемёта Калашникова (РПК), снайперской винтовки Драгунова (СВД), ручного противотанкового гранатомета 7 (РПГ-7) и др. (рисунок 3).

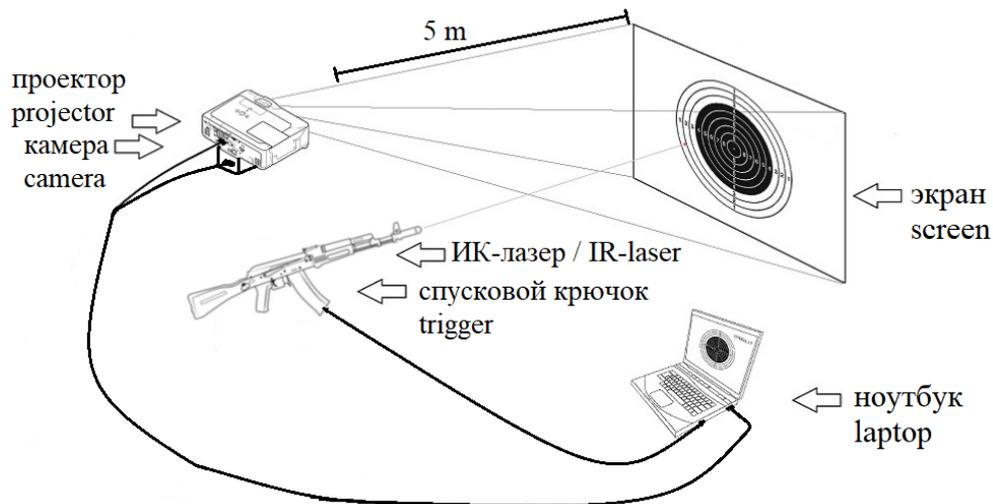


Рисунок 3 – Структура стрелкового тренажёра базового уровня в двухэкранный конфигурации

Figure 3 – Basic level shooting simulator structure in a two-screen configuration

При стандартной ширине проекционно-го экрана 2 м угловой размер в 5 м составляет 20° (на виртуальной дистанции 100 м имеем фронт 35 м), что вполне позволяет реализовать на нём почти все упражнения Курса стрельб. При этом возможна поддержка со стороны ПО двух рабочих мест (и даже трёх и более) и поддержка нескольких проекторов для панорамного экрана, что необходимо для некоторых специфичных упражнений (т. е. СТ БУ в максимальной конфигурации уже относится к стационарным полупрофессиональным тренажёрам). Регистрация координат ТПр осуществляется непрерывно (сохраняются в кольцевых буферах) для анализа совокупности ТПр перед выстрелом и сразу после него.

Принцип работы РТПр БУ: изображения пятна лазерного излучателя оружия (не обязательно ИК-диапазона) через светофильтр цифровой камеры позволяют определить ТПр по ММ и не требуют ежедневной тарировки из-за инвариантности к рабочему месту (некоторые проблемы могут возникнуть по разделению ТПр от нескольких ИО в виде лазерных пятен по рабочим местам). USB АЦП-блок на ИО управляет лазерным излучателем, отдачей, обрабатывает спусковой крючок, возвращает показания прицельной планки и др. датчиков оружия (магазина, свала, предохранителя и др.), что, конечно, требует доработки макетов оружия, особенно для реализации отдачи (будет рассмотрено

в следующих статьях цикла). Возможно поставить одновременно два видимых лазерных излучателя на ИО один под другим – верхний обязательно параллельно линии прицеливания, а нижний под небольшим углом вниз (можно и вбок с углом $\approx 2^\circ$ (35 т.д.). Это даст возможность оценить свал оружия и расстояние до рабочего места (с пересчётом масштаба мишеней) и даже облегчит распознавание двух рабочих мест (а больше на одном экране фактически и не поместится при реализации реалистичной мишенной обстановки): если у одного лазер красный, а у другого зелёный или у одного второй лазер вниз, а у другого по диагонали вправо, например. Видимые постоянные лазеры ниже линии прицеливания экранируются для стрелка самим ИО и не мешают тренироваться, т. е. вполне допустимы для СТ БУ, а режим «лазер светит только по нажатию крючка» не позволяет контролировать линию прицеливания до выстрела, но также может использоваться. Отдача на ИО может быть реализована вибромотором на стволе, который по нажатию спускового крючка сбивает линию прицеливания, или на пневматической системе с поршнем и клапаном в прикладе.

Тренажёры профессионального уровня предназначены для применения в структурах МО, МВД, ФСБ; отличаются очень высокой ценой, высокой априорной точностью (0,1–0,3 т.д.) и частотой опроса (120–240 Гц).

РТПр ПУ основан на принципе «излучатель на оружии – приёмник у экрана», использует специализированные компоненты. При этом тренажёр поддерживает возможность выбора стрелкового оружия из множества разнообразных видов с полноценной реализацией отдачи (не менее 50 % реальной, на пневмосистеме или механике с опорой) и спецэффектов (рисунок 4). ИО, а это как минимум АК, ПМ, РПК, пулемёт Калашникова модернизированный

(ПКМ), СВД, РПГ-7, гранатомет подствольный (ГП-25), оснащены большим количеством датчиков: магазина, переключателя огня, свала (наклонов), срыва (дерганья), прижима приклада, показаний всех видов прицелов (механического/оптического/ночного), что позволяет полностью контролировать правильность обращения с оружием и фиксировать все виды ошибок в упражнениях из Курса стрельб.

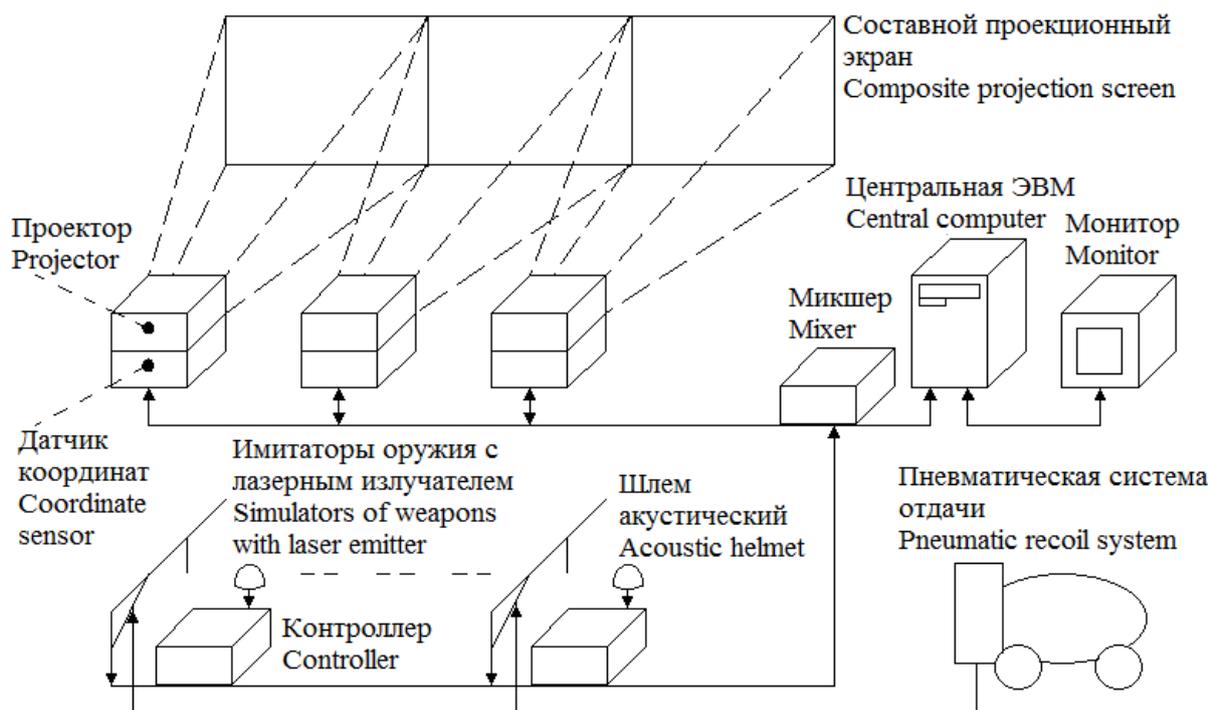


Рисунок 4 – Структура стрелкового тренажёра профессионального уровня в четырёхэкранной конфигурации

Figure 4 – Professional level shooting simulator structure in four-screen configuration

Принцип работы РТПр ПУ [25]: изображения ИК-пятна импульсного лазера линии прицеливания оружия (невидимые глазом) через светофильтр цифровой регистрирующей системы позволяют определить ТПр по ММ, привязав по времени прихода импульса к соответствующему рабочему месту. Благодаря типичной трёхэкранный конфигурации (рисунок 4, принципиальных ограничений на количество проекционных экранов и рабочих мест нет) угловой размер изображения (при общей ширине экрана не менее 6 м) может достигать 60° (на виртуальной дистанции 100 м даёт фронт

115 м), что позволяет реализовать на нём все упражнения Курса стрельб и поддерживать при этом до 8 рабочих мест (с гарантией технических характеристик). Именно таким тренажёром и является «Ингибитор» 1У33.

Тренажёры специального уровня предназначены для применения в охранных, спортивных и охотничьих структурах, в развлекательной индустрии, в т.ч. с использованием боевой стрельбы, отличаются очень широким диапазоном стоимости и технических характеристик. РТПр СУ могут быть реализованы на различных принципах: от спецодежды

для краски в случае пейнтбола и фанерных мишеней для боевой стрельбы резиновыми пулями в «городской» местности с одной стороны и до пробиваемых мультимедийных экранов боевой стрельбы и мобильных систем виртуальной реальности с практически полной свободой поведения, хотя и условной, с другой стороны. Самые перспективные тренажёры на виртуальной (или дополненной) реальности позволяют отслеживать поворот головы и направление прицеливания ИО по гироскопам

(акселерометрам) и замешивают в реальную местность с камеры мишенную обстановку – дополненная реальность. Но проблема реализации имитации отдачи остаётся ещё актуальной, особенно с сохранением массогабаритных характеристик ИО и мобильности обучаемых.

Таким образом, предложены основные структуры общедоступных тренажёров НУ и БУ с вполне удовлетворительными характеристиками (таблица 1).

Таблица 1 / Table 1

Характеристики уровней реализации стрелковых тренажёров

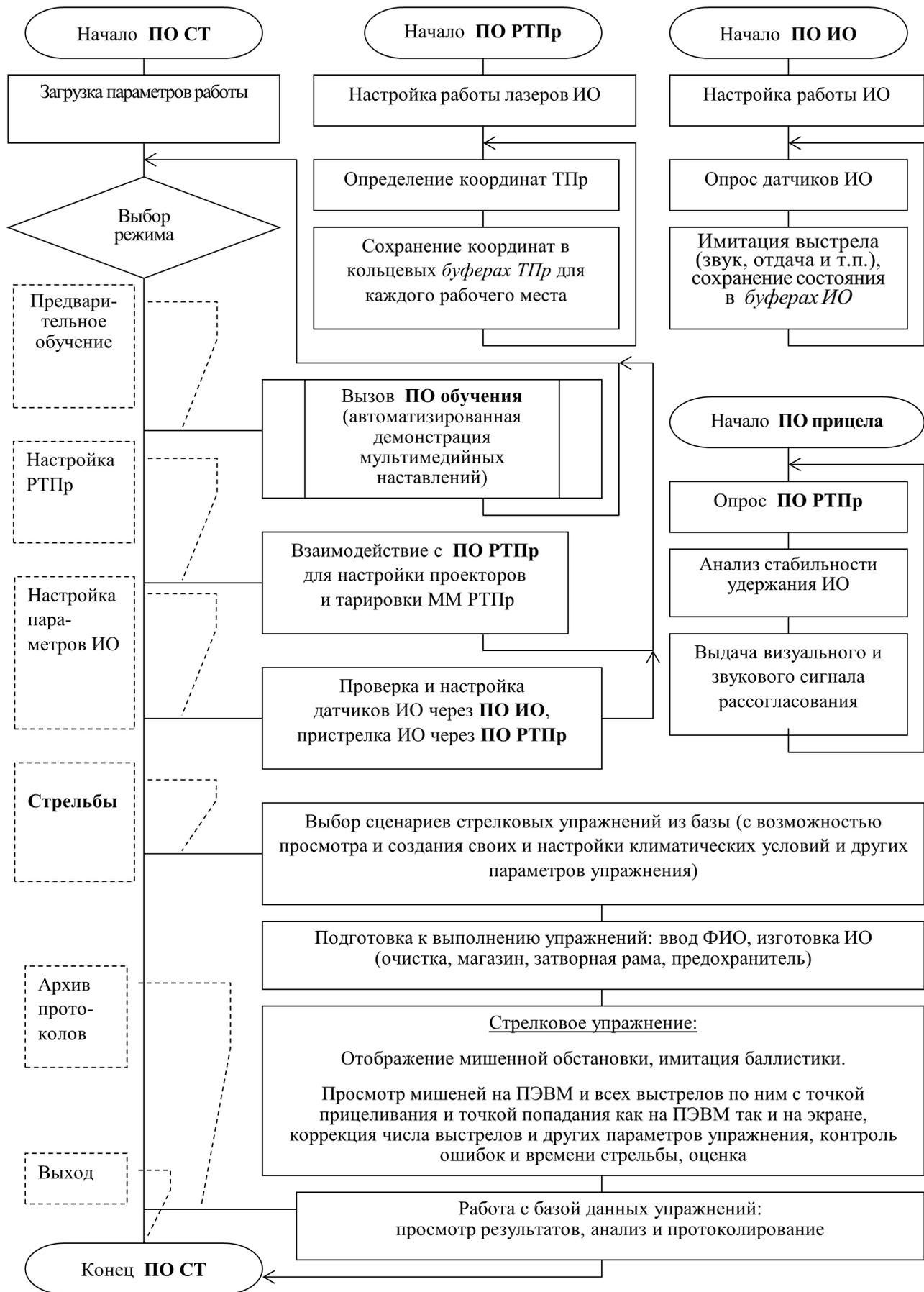
Characteristics of levels of implementation of shooting simulators

Уровень «СТрИж» "STrIzh" level	σ ТПр, т.д. σ AM, t.r.	Частота опроса ТПр, Гц AM sampling frequency, Hz	Отдача Return	Частота ИО Frequency of WS, Hz
Начальный Entry	0.6–1.5	15–60	пружина/вибро spring/vibration	30
Базовый Basic	0.3–0.8	30–120	вибро+/пневмо vibration +/pneumatic	60
Профессиональный Professional	0.1–0.3	120–240	пневмо/механ pneumatic/mechanical	100
Специальный Special	0.1–1.0	60–240	пневмо/механ pneumatic/mechanical	50–150

Программное обеспечение семейства тренажёров

Обобщённая функциональная блок-схема ПО СТ «СТрИж» представлена на рисунке 5 и базируется на [24]. ПО СТ организует выполнение стрелковых упражнений согласно протоколам боевых стрельб (подготовка-выполнение-завершение) с предварительной настройкой ПО РТПр и ПО ИО (которые постоянно выполняются на компьютере для обслуживания оборудования тренажёра с буферами состояний для анализа). ПО обучения, например, как [26], включает мультимедийный курс, описывающий все виды вооружений и правила стрельбы с учётом внутренней и внешней баллистики конкретного образца. Сценарии упражнений из Курса стрельб могут быть, например,

в виде [27] и поддерживают случайные места появления мишеней при каждом выполнении. Наиболее актуально ПО прицела для начальной тренировки удержания оружия, которое постоянно контролирует ТПр и выдаёт звуковой сигнал с повышающейся частотой и громкостью при увеличении отклонения от цели (что удобно для самостоятельных занятий). ПО СТ позволяет настроить многие параметры упражнения: выбрать вид стрельбища, задать места мишеней и их поведение, указать параметры атмосферы (температуру, давление, скорость бокового ветра, выбрать сезон, время дня, туман и др.), изменить количество патронов и их тип, ведёт стрелковое упражнение и позволяет посмотреть подробные результаты (ТПр+точка попадания, время выстрела) и выставить оценку с сохранением в базе данных.



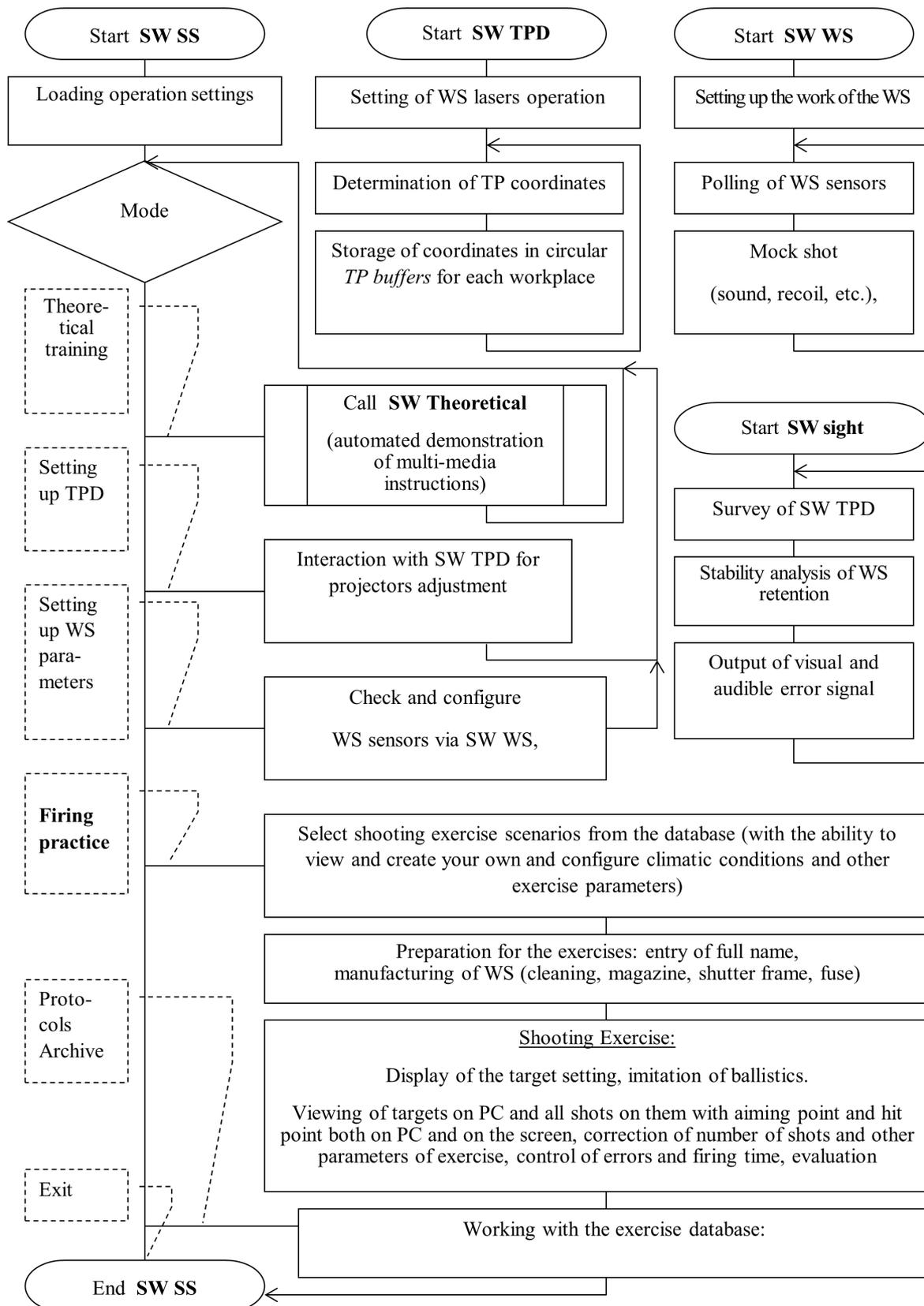


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма работы программного обеспечения тренажёра: ПО – программное обеспечение; СТ – стрелковый тренажер; ИО – имитатор оружия; РТПр – регистратор точки прицеливания

Figure 5 – Flowchart of an operation algorithm of software of the exercise machine: SW – software; SS – shooting simulator; WS – weapon simulator; TPD target point determiner

Математическая модель баллистической траектории

ММ траектории метаемого снаряжения (в данном случае пули или гранаты) в СТ НУ и БУ базируется на [28], расширена авторскими доработками [29, 30] и адаптирована для дозвукового и реактивного оружия [31–33] на базе дифференциальных уравнений по дальности (dx):

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dx} &= -c_2 v C_x \left(\frac{v}{a_c} \right); & \frac{d\gamma}{dx} &= -\frac{g}{u^2}; \\ \frac{dy}{dx} &= \gamma = \operatorname{tg}\theta; & \frac{dt}{dx} &= \frac{1}{u}; & v &= u\sqrt{1+\gamma^2} \end{aligned} \right\}$$

где y, x, z – координаты центра массы пули; c_2 – коэффициент сопротивления; $u = v \cos\theta$ – проекция скорости v с углом θ на ось X ; t – время движения пули по траектории; $\gamma = \operatorname{tg}\theta$ – тангенс угла θ вектора скорости; g – ускорение свободного падения ($9,815 \text{ м/с}^2$); a – скорость звука ($a_c = 340,4 \text{ м/с}$ при температуре $T_c = 288 \text{ К}$ и давлении $p_c = 760 \text{ мм рт. ст.}$); $C_x(v/a)$ – лобовое сопротивление воздуха по закону 1943 года [28].

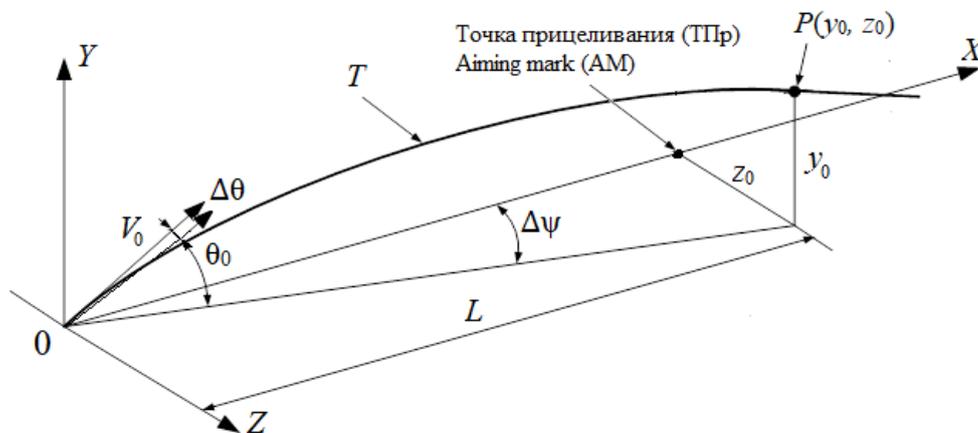


Рисунок 6 – Система координат тренажёра и баллистическая траектория. Траектория пули T , проходящая через точку попадания $P_{(y_0, z_0)}$ на рубеже L с начальной скоростью V_0 и углом бросания (зависит от прицела) θ_0

Figure 6 – Simulator coordinate system and ballistic trajectory. The trajectory of the bullet T , passing through the point of hit $P_{(y_0, z_0)}$ at the turn of L with initial speed V_0 and throwing angle (depends on the sight) θ_0

Таким образом, после определения координат ТПр строится баллистическая кривая по ММ с учётом атмосферных факторов (температуры и давления, которые изменяют возвышение y , и ветра, который смещает пулю в сторону по z), с учётом параметров ИО и вида боеприпаса и его конкретного рассеивания по нормальному закону $N(M, \sigma)$, который моделируется

В качестве упрощения ММ внешней баллистики СТ НУ и БУ считается, что стрелок расположен строго напротив ТПр, полученной от РТПр (т. е. игнорируется угол места цели и угол курса, что вполне допустимо при рабочем угле экрана не более $5\text{--}20^\circ$ для СТ НУ и БУ) и мишенная обстановка без рельефа с плоскими 2D-целями (в т. ч. подвижными). Прицельный настильный выстрел планируется в системе XYZ (рисунок 6, традиционно для баллистики ось X идёт вдаль и всегда проходит через ТПр), но из-за баллистического рассеивания, связанного с допусками на характеристики патрона (вес и диаметр пули, вес и температура пороха) и на параметры ствола, из-за нутации, прецессии, даже от порядка выстрела в очереди (таблица 2, где индекс 1-первый или +-последующие) и других случайных факторов (в том числе хвата со свалом и удержания навыков обучаемого), фактический выстрел осуществляется со случайным «боковым» $B_{\delta(z_0)}$ и «верхним» $B_{\delta(y_0)}$ срединными отклонениями от ТПр (когда 50 % точек попадания в пределах $\pm B$ от ТПр), пересчитанными в угловые среднеквадратические отклонения погрешности $\Delta\psi$ и $\Delta\theta$ (таблица 2).

равномерным законом $Rand()$, и изменяющего незначительно углы бросания θ и курса ψ за вычетом экспериментально определенной погрешности РТПр σ_{ann} (в угл. секундах “):

$$N(M, \sigma) = M + \left(\sum_1^{12} Rand() - \frac{12}{2} \right) \sigma;$$

$$\theta = N(\theta_0, \sqrt{(1.483\Delta\theta)^2 - \sigma_{ann}^2}); \quad \psi = N(0, \sqrt{(1.483\Delta\psi)^2 - \sigma_{ann}^2}).$$

Алгоритм моделирования баллистической траектории

Итак, на ММ баллистики СТ НУ и БУ влияют следующие внешние факторы (параметры ММ, таблицы 2, 3):

1. Типы ИО и боеприпаса учитывается через начальную скорость v_0 , высоту мушки над точкой вылета y_0 и баллистический коэффициент пули c (зависит от её формы и массы и влияет на сопротивление воздуха, таблица 3) [34].

2. Угол бросания θ_0 определяется по конкретным показаниям прицелов дальности ИО (их 11 для АК, РПК, 1 для ПМ; 10 для РПГ-7) из таблицы 3.

3. Баллистическое рассеивание боеприпасов с с.к.о. $\sigma = 1.483 \cdot B$ (где $B_\theta = \Delta\theta$, $B_\psi = \Delta\psi$) учитывается по данным таблицы 2 по нормальному распределению $N(M, \sigma)$ от верхнего и бокового срединных отклонений (B_θ, B_ψ) и от порядка выстрела в очереди (первый/последующие) и влияет на координаты y и z .

4. Температура T и давление p воздуха, которые оказывают существенное влияние на

сопротивление воздуха пуле, учитываются через закон подобия Ланжевена [28], а $T_c = 288$ К (15°C) и $p_c = 760$ мм рт.ст.

5. Ветер боковой со скоростью W_z , учитывается по отдельной ММ [28], на время одного выстрела скорость считается постоянной:

$$z = W_z \cdot \left(t - \frac{x}{v_0 \cdot \cos(\theta_0)} \right),$$

где W_z – скорость боковой составляющей ветра.

Для РПГ-7, где на активном участке отклонение гранаты идёт против ветра, авторами разработана ММ [32]:

$$z = \frac{W_z}{4} (-0.0092 + 0.49t + 5.52t^2 - 4.147t^3 + 0.88t^4),$$

с коэффициентом ветровой модели $K_w = -4$.

Таким образом, ММ баллистической траектории на базе системы дифференциальных уравнений по координате дальности x (dx) с шагом интегрирования h и на основе закона подобия Ланжевена, который учитывает влияние температуры T и давления воздуха p , с авторским учётом баллистического рассеивания и отклонения пули от ветра имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} c, v_0, \theta_0, y_0, \Delta\theta, \Delta\psi, h, K_w - \text{из таблиц по ИО и прицелу}; \quad v = v_0 \left(1 + 0.000638(T - T_c) \right) \sqrt{\frac{T_c}{T}}; \\ \theta = N(\theta_0, \sqrt{(1.483\Delta\theta)^2 - \sigma_{\text{ам}}^2}); \quad \psi = N(0, \sqrt{(1.483\Delta\psi)^2 - \sigma_{\text{ам}}^2}); \quad c_2 = 0.00048104c \frac{p}{p_c}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dx} = -c_2 v C_x \left(\frac{v}{a} \right); \quad \frac{d\gamma}{dx} = -\frac{g}{u^2}; \quad \frac{dy}{dx} = \gamma = \text{tg}\theta; \quad \frac{dt}{dx} = \frac{1}{u}; \quad v = u \sqrt{1 + \gamma^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} = x \frac{T}{T_c}; \quad \bar{t} = t \sqrt{\frac{T}{T_c}}; \\ \bar{v} = v \sqrt{\frac{T}{T_c}}; \quad \bar{y} = y \frac{T}{T_c}; \end{aligned} \right\} \bar{z} = \begin{cases} \bar{x} \text{tg}(\psi) + W_z \left(\bar{t} - \frac{\bar{x}}{v_0 \cos(\theta_0)} \right), & \text{если } (K_w > 0), \\ \bar{x} \text{tg}(\psi) - \frac{W_z}{4} (-0.0092 + 0.49\bar{t} + 5.52\bar{t}^2 - 4.147\bar{t}^3 + 0.88\bar{t}^4), & \text{иначе} \end{cases} \quad (3)$$

где y, x, z – координаты центра массы пули базовой ММ (2); c_2 – коэффициент сопротивления; $u = v \cos\theta$ – проекция скорости v с углом θ на ось X ; t – время движения пули по траектории; $\gamma = \text{tg}\theta$ – тангенс угла θ вектора скорости; g – ускорение свободного падения ($9,815 \text{ м/с}^2$); a – скорость звука ($a_c = 340,4 \text{ м/с}$ при температуре $T_c = 288 \text{ К}$ и давлении $p_c = 760 \text{ мм рт.ст.}$); $C_x(v/a)$ – лобовое сопротивление воздуха по закону 1943 года [28]; W_z , σ – скорость бокового ветра; $\sigma_{\text{ам}}$ – с.к.о. погрешности определения ТПр регистратором

точки прицеливания НУ или БУ; $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}, \bar{v}$ – координаты центра массы пули ММ, время и скорость с учётом всех поправок.

После инициализации исходных данных по (1), запускается цикл интегрирования баллистической модели (2) с шагом h до дальности $x = 2000 \text{ м}$ или возвышения $y = -50 \text{ м}$ с пересчётом координат по (3) для учёта всех атмосферных факторов и случайного рассеивания.

Испытания ММ баллистической траектории показали её соответствие таблицам стрельб соответствующих вооружений и отражены в [30–32].

Таблица 2 / Table 2

Угловые параметры рассеивания боеприпасов
Angular parameters of ammunition dispersion

ИО / WS	AKM1	AKM+	AK741	AK74+	РПК741	РПК74+	РПГ-7	ПМ
$\Delta\theta$, “	99.00	127.88	85.57	63.94	63.94	82.52	206.26	371.3
$\Delta\Psi$, “	84.57	229.99	42.28	82.51	62.91	82.50	288.77	371.3

AK – Kalashnikov; РПК – Kalashnikov light machine gun; РПГ – hand-held anti-tank grenade launcher; ПМ – Makarov pistol

Таблица 3 / Table 3

Параметры баллистики вооружения, $K_w = 1$
Parameters of small arms ballistics, $K_w = 1$

ИО патр	v_0 , м/с	y_0 , см	c , кг/м ³	h , м	Θ П	Θ 100	Θ 200	Θ 300	Θ 400	Θ 500	Θ 600	Θ 700	Θ 800	Θ 900	Θ 1000
ПМ	315	-1.4	15.94	0.1	6'18"	22'23"	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AK74 ссс	922	-5.1	8.65	0.2	14'06"	4'01"	5'48"	8'41"	12'22"	16'58"	22'43"	30'01"	39'10"	50'20"	63'28"
РПК74 ссс	960	-5.1	8.55	0.2	12'33"	3'44"	5'11"	7'38"	10'46"	14'39"	19'28"	25'31"	33'09"	42'39"	54'05"
AKM ссс	715	-5.1	8.82	0.2	23'54"	5'22"	8'52"	13'54"	20'24"	28'41"	39'06"	51'43"	66'28"	83'20"	102'24"
AKM бр-з	730	-5.1	9.65	0.2	23'54"	5'22"	8'52"	13'54"	20'24"	28'41"	39'06"	51'43"	66'28"	83'20"	102'24"
AKM заж	745	-5.1	10.45	0.2	23'54"	5'22"	8'52"	13'54"	20'24"	28'41"	39'06"	51'43"	66'28"	83'20"	102'24"
РПГ-7 +15	265	0	9.00	0.1	$K_w=-4$	-	53'30"	83'20"	116'42"	153'01"	-	-	-	-	-
РПГ-7 -15	265	0	9.00	0.1	$K_w=-4$	-	56'17"	88'20"	124'17"	164'08"	-	-	-	-	-

AK – Kalashnikov; РПК – Kalashnikov light machine gun; РПГ – hand-held anti-tank grenade launcher; ПМ – Makarov pistol

«ссс» – патроны со стальным сердечником (steel core cartridges);

«бр-з» – бронебойно-зажигательные (armor-piercing incendiary cartridges);

«зж» – зажигательные (incendiary cartridges)

Заключение

Основные выводы по структурным схемам тренажёра и математической модели:

1. Тренажёр начального уровня, который можно собрать самостоятельно, хотя и не отличается высокой точностью и реалистичностью, вполне способен привить основные навыки в хвате и прицеливании пистолета Макарова

и автомата Калашникова 74 и может найти применение в школах и структурах ДОСААФ.

2. Тренажёр базового уровня, сборка которого требует некоторых вложений, уже отличается достаточной точностью и реалистичностью, способен реализовывать почти все упражнения из Курса стрельб (AKM, ПМ, АК, РПК, РПГ) и может использоваться не только в структурах ДОСААФ, но и в МВД и МО.

3. Тренажёры специального назначения (для охотников, спортсменов и др.) должны быть очень высокой точности и при этом сохранять реалистичность оружия, что как раз обуславливает высокую стоимость (особенно в обслуживании), но резко повышает гибкость подготовки профессионалов.

4. Тренажёры профессионального назначения должны обладать в первую очередь широкими функциональными возможностями (помимо точности и реалистичности) для реализации стрелковых упражнений из Курса стрельб (не только начальные, учебные и контрольные, но и по разведке местности, действиям в обороне, тактическому взаимодействию), и особенно в поддержке носимого вооружения (АК, РПК, ПМ, ПКМ, СВД, РПГ-7, ГП-25 и др.) и мишенной обстановки и могут найти применения в структурах МО и в спецподразделениях благодаря безопасности и быстрой окупаемости.

Все тренажёры достаточно быстро окупаются за счёт экономии боеприпасов (особенно реактивных гранат), экономии на организации и безопасности боевых стрельб, больших возможностей при проведении тренировок из-за доступности и интерактивной обратной связи для исправления ошибок (что позволяет заниматься самостоятельно без руководителя).

К настоящему времени наиболее актуальным направлением совершенствования стрелковых тренажёров являются исследования в области мобильных тренажёров виртуальной реальности с ориентацией на полное погружение и отработку тактических навыков: перемещение, укрытие, концентрация огня, взаимодействие в группе, правомочность применения оружия и др.

Список используемых источников

1. Веркиенко Ю.В., Казаков В.С., Коробейников В.В., Егоров С.Ф., Казаков С.В. Тренажер оптико-электронный для стрелкового оружия // Вестник академии военных наук. 2008. № 4. С. 84–89.
2. Казаков В.С., Коробейников В.В., Егоров С.Ф., Корнилов И.Г. Перспективы развития электронных стрелковых тренажёров // Интеллектуальные системы в производстве. 2010. № 2(16). С. 138–142.
3. Егоров С.Ф., Казаков В.С., Коробейников В.В. Стрелковый тренажер на общедоступных компонен-

тах // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1(17). С. 182–190.

4. Егоров С.Ф., Казаков В.С., Коробейников В.В. Регистратор точки прицеливания на базе видеокамеры // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1(17). С. 177–182.

5. Егоров С.Ф., Коробейников В.В., Казаков В.С., Корнилов И.Г. Разработка методики испытания и исследование критериев отбора видеокамер для использования в стрелковых тренажерах // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2014, № 3. С. 118–122.

6. Шелковников Ю.К., Осипов Н.И., Кизнерцев С.Р. Стрелковый тренажер на основе телевизионного сканистора // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. № 1(25). С. 128–132.

7. Егоров С.Ф., Шелковников Ю.К., Осипов Н.И., Кизнерцев С.Р., Метелева А.А. Исследование оптико-электронных регистраторов точки прицеливания стрелковых тренажеров // Проблемы механики и материаловедения. Труды Института механики УрО РАН. Ижевск. 2017. С. 227–248.

8. Gudzbeler G., Struniawski J. Methodology of shooting training using modern IT techniques // Conference on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments (Wilga, Poland). 2017. Vol. 10445, no. UNSP 104456L. DOI: 10.1117/12.2281618

9. Gudzbeler G., Struniawski J. Functional assumptions of "Virtual system to improve shooting training and intervention tactics of services responsible for security" (VirtPol) // Conference on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments (Wilga, Poland). 2017. Vol. 10445, no. UNSP 104456M. DOI: 10.1117/12.2281622

10. Lábr M., Hagara L. Using open source on multi-parametric measuring system of shooting // ICMT 2019 – 7th International Conference on Military Technologies. DOI: 10.1109/MILTECHS.2019.8870093

11. Jedrasiak K., Daniec K., Sobel D. The Concept of Development and Test Results of the Multimedia Shooting Detection System // Future Technologies Conference (FTC) San Francisco. 2016. Pp. 1057–1064.

12. Bogatinov D., Lameski P., Trajkovik V. Firearms training simulator based on low cost motion tracking sensor // Multimedia tools and applications. 2017. Vol. 76, no. 1. Pp. 1403–1418. DOI: 10.1007/s11042-015-3118-z

13. Liu Yu., Wei P., Ke J. Algorithm Design For A Gun Simulator Based On Image Processing // International Conference on Optical Instruments and Technology – Optoelectronic Imaging and Processing Technology. 2015. Vol. 9622, no. 96220O.

14. Borja-Benitez M.A., Tirado-Mendez J.A., Vasquez-Toledo L.A. Shooting impact detection system on

a fixed target using a dynamic video frame reference // IEEE International Autumn Meeting on Power Electronics and Computing. 2019. Pp. 1–6.

15. Kingkangwan K., Chalainanont N., Kumsap C. Gun Identification using Image Synchronization for DTI's Virtual Shooting Range // 2nd Asian Conference on Defence Technology (ACDT) Chiang Mai, Thailand. 2016. Pp. 32–35.

16. Taylor P. Dispatch Priming and the Police Decision to Use Deadly Force // Police Quarterly. 2020. Vol. 23, no. 3. Pp. 311–332.

DOI: 10.1177/1098611119896653

17. Fedaravičius A., Pilkauskas K., Slizys E., Survila A. Research and development of training pistols for laser shooting simulation system // Defence Technology. 2019. Vol. 16, no. 3. Pp. 530–534.

DOI: 10.1016/j.dt.2019.06.018

18. Muñoz J.E., Pope A.T., Velez L.E. Integrating Biocybernetic Adaptation in Virtual Reality Training Concentration and Calmness in Target Shooting // Physiological Computing Systems. Lecture Notes in Computer Science. 2019. Vol 10057. Springer, Cham.

DOI: 10.1007/978-3-030-27950-9_12

19. De Armas C., Tori R., Netto A.V. Use of virtual reality simulators for training programs in the areas of security and defense: a systematic review // Multimed Tools Appl. 2019.

DOI: 10.1007/s11042-019-08141-8

20. Fan Y.C., Wen C.Y. A Virtual Reality Soldier Simulator with Body Area Networks for Team Training // Sensors. 2019. Vol. 19, no. 451.

DOI: 10.3390/s19030451

21. Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N. Optoelectronic tracking system for shooting simulator – tests in a virtual reality application // Photonics letters of Poland. 2020. Vol. 12, no. 2. Pp. 61–63.

DOI: 10.4302/plp.v12i2.1025

22. Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N. Design and Evaluation of a SteamVR Tracker for Training Applications – Simulations and Measurements // Metrology and Measurement systems. 2020. Vol. 27, no. 4. Pp. 601–614.

DOI: 10.24425/mms.2020.134841

23. Казаков В.С., Веркиенко Ю.В., Коробейников В.В., Афанасьева Н.Ю. Оптико-электронные стрелковые тренажеры. Теория и практика. Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2007. 260 с.

24. Егоров С.Ф. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: функциональная схема программного обеспечения // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17, № 2. С. 19–29.

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-2-19-29

25. Егоров С.Ф., Корнилов И.Г., Шелковников Ю.К., Кизнерцев С.Р., Коробейникова И.В.,

Марков Е.М. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: программное обеспечение регистратора точки прицеливания // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 2. С. 71–84.

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-71-84

26. Егоров С.Ф., Осипов Н.И., Кизнерцев С.Р. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: программное обеспечение изучения оружия // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17. № 3. С. 55–66.

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-3-55-66

27. Егоров С.Ф., Коробейникова И.В. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: формат файлов сценариев учебных упражнений // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17, № 4. С. 18–31.

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-4-18-31

28. Коновалов А.А., Николаев Ю.В. Внешняя баллистика. Ижевск. 2003. 192 с.

29. Егоров С.Ф., Вдовин А.Ю., Шелковников Ю.К. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: программное обеспечение баллистики оружия калибра 5,45 // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. № 2. С. 50–61.

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-50-61

30. Егоров С.Ф., Вдовин А.Ю., Коробейникова И.В., Петухов К.Ю., Сяктерев В.Н. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: математическое обеспечение баллистики оружия калибра 7,62 // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. № 3. С. 121–133.

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-3-121-133

31. Егоров С.Ф. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: математическое обеспечение баллистики дозвукового оружия // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. № 4. С. 76–87.

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-4-76-87

32. Егоров С.Ф., Вдовин А.Ю., Шелковников Ю.К., Корнилов И.Г., Петухов К.Ю., Афанасьев В.А. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: математическое обеспечение баллистики реактивного оружия // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20. № 1. С. 56–68.

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-1-56-68

33. Егоров С.Ф., Шелковников Ю.К. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: программное обеспечение баллистической «задачи встречи» // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20, № 2. С. 114–127. **DOI:** 10.22213/2410-9304-2022-2-114-127

34. Егоров С.Ф., Вдовин А.Ю. Исследование необходимости использования переменного значения баллистического коэффициента при моделировании траектории пули в стрелковом тренажере // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2023. Т. 23. № 2. С. 253–263.

DOI: 10.18500/1816-9791-2023-23-2-253-263

References

1. Verkienko YuV, Kazakov VS, Korobeinikov VV, Egorov SF, Kazakov SV. The exercise machine optical-electronic for small arms. *Vestnik akademii voennykh nauk*. 2008;4:84-89. (In Russ.).
2. Kazakov VS, Korobeinikov VV, Egorov SF, Komilov IG. Prospects for the development of electronic shooting simulators. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2010;2:138-142. (In Russ.).
3. Egorov SF, Kazakov VS, Korobeinikov VV. Shooting simulator on public components. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2011;1:182-190. (In Russ.).
4. Egorov SF, Kazakov VS, Korobeinikov VV. Recorder of aiming point on the basis of video camera. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2011;1:177-182. (In Russ.).
5. Egorov SF, Korobeinikov VV, Kazakov VS, Komilov IG. Development of test methodology and examination of criteria for selection of video cameras for use in shooting simulators. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2014;3:118-122. (In Russ.).
6. Shelkovnikov YuK, Osipov NI, Kiznertsev SR. The shooting exercise machine on the basis of the television scanistor. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2015;1:128-132. (In Russ.).
7. Egorov SF, Shelkovnikov YuK, Osipov NI, Kiznertsev SR, Meteleva AA. Research of optical-electronic registrars of an aiming mark of shooting exercise machines. *Problems of mechanics and materials science. Works of Institute of mechanics UB RAS. Izhevsk*. 2017;227-248. (In Russ.).
8. Gudzbeler G, Struniawski J. Methodology of shooting training using modern IT techniques. *Conference on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments (Wilga, POLAND)*. 2017;10445(UNSP 104456L). **DOI:** 10.1117/12.2281618
9. Gudzbeler G, Struniawski J. Functional assumptions of "Virtual system to improve shooting training and intervention tactics of services responsible for security" (VirtPol). *Conference on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments (Wilga, POLAND)*. 2017;10445(UNSP 104456M). **DOI:** 10.1117/12.2281622
10. Lábr M, Hagara L. Using open source on multi-parametric measuring system of shooting. *ICMT 2019 – 7th International Conference on Military Technologies*. **DOI:** 10.1109/MILTECHS.2019.8870093
11. Jedrasiak K, Daniec K, Sobel D. The Concept of Development and Test Results of the Multimedia Shooting Detection System. *Future Technologies Conference (FTC) San Francisco*. 2016:1057-1064.
12. Bogatinov D, Lameski P, Trajkovic V. Firearms training simulator based on low cost motion tracking sensor. *Multimedia tools and applications*. 2017;76(1):1403-1418. **DOI:** 10.1007/s11042-015-3118-z
13. Liu Yu, Wei P, Ke J. Algorithm Design For A Gun Simulator Based On Image Processing. *International Conference on Optical Instruments and Technology – Optoelectronic Imaging and Processing Technology*. 2015; 9622(962200).
14. Borja-Benitez MA, Tirado-Mendez JA, Vasquez-Toledo LA. Shooting impact detection system on a fixed target using a dynamic video frame reference. *IEEE International Autumn Meeting on Power Electronics and Computing*. 2019:1-6.
15. Kingkangwan K, Chalainanont N, Kumsap C. Gun Identification using Image Synchronization for DTI's Virtual Shooting Range. *2nd Asian Conference on Defence Technology (ACDT) Chiang Mai, Thailand*. 2016:32-35.
16. Taylor P. Dispatch Priming and the Police Decision to Use Deadly Force. *Police Quar-Terly*. 2020;23(3):311-332. **DOI:** 10.1177/1098611119896653
17. Fedaravičius A, Pilkauskas K, Slizys E, Survila A. Research and development of training pistols for laser shooting simulation system. *Defence Technology*. 2019;16(3):530-534. **DOI:** 10.1016/j.dt.2019.06.018
18. Muñoz JE, Pope AT, Velez LE. Integrating Biocybernetic Adaptation in Virtual Reality Training Concentration and Calmness in Target Shooting. *Physiological Computing Systems. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham. 2019;10057. **DOI:** 10.1007/978-3-030-27950-9_12
19. De Armas C, Tori R, Netto AV. Use of virtual reality simulators for training programs in the areas of security and defense: a systematic review. *Multimed Tools Appl*. 2019. **DOI:** 10.1007/s11042-019-08141-8
20. Fan YC., Wen CY. A Virtual Reality Soldier Simulator with Body Area Networks for Team Training. *Sensors*. 2019;19(451). **DOI:** 10.3390/s19030451
21. Maciejewski M, Piszczek M, Pomianek M, Palka N. Optoelectronic tracking system for shooting simulator – tests in a virtual reality application. *Photonics letters of Poland*. 2020;12(2):61-63. **DOI:** 10.4302/plp.v12i2.1025
22. Maciejewski M, Piszczek M, Pomianek M, Palka N. Design and Evaluation of a SteamVR Tracker for Training Applications – Simulations and Measurements. *Metrology and Measurement systems*. 2020;27(4):601-614. **DOI:** 10.24425/mms.2020.134841
23. Kazakov VS, Verkienko YuV, Korobeinikov VV, Afanas'eva NYu. Optical-electronic shooting exercise machines. *Theory and practice. Izhevsk, Institute of mechanics UB RAS*. 2007:260. (In Russ.).
24. Egorov SF. Shooting simulator «Inhibitor»: functional diagram of the software. *Intellektual'nye sistemy v*

производстве. 2019;17(2):19-29. (In Russ.).

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-2-19-29

25. Egorov SF, Kornilov IG, Shelkovnikov YuK, Kiznertsev SR, Korobeinikova IV, Markov EM. Shooting simulator «Inhibitor»: targeting point recorder software. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2020;18(2):71-84. (In Russ.). **DOI:** 10.22213/2410-9304-2020-2-71-84

26. Egorov SF, Osipov NI, Kiznertsev SR. Shooting simulator «Inhibitor»: software of studying of weapon. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2019;17(3):55-66. (In Russ.). **DOI:** 10.22213/2410-9304-2019-3-55-66

27. Egorov SF, Korobeynikova IV. Shooting simulator «Inhibitor»: Exercise Script File Format. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2019;17(4):18-31. (In Russ.).

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-4-18-31

28. Konovalov AA, Nikolaev YuV. Exterior ballistics. *Izhevsk*. 2003:192. (In Russ.).

29. Egorov SF, Vdovin AYu, Shelkovnikov YuK. Shooting simulator «Inhibitor»: 5.45 caliber weapon ballistics software. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2021;19(2):50-61. (In Russ.).

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-50-61

30. Egorov SF, Vdovin AYu, Korobeinikova IV, Petukhov KYu, Syakterev VN. Shooting simulator «Inhibitor»: mathematical support of 7.62 caliber weap-

on ballistics. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2021;19(3):121-133. (In Russ.).

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-3-121-133

31. Egorov SF. Shooting simulator «Inhibitor»: mathematical support for the ballistics of sub-sonic weapons. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2021;19(4):76-87. (In Russ.).

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-4-76-87

32. Egorov SF, Vdovin AYu, Shelkovnikov YuK, Kornilov IG, Petukhov KYu, Afanas'ev VA. Shooting simulator «Inhibitor»: mathematical support of ballistics of reactive weap-ons. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2022;20(1):56-68. (In Russ.).

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-1-56-68

33. Egorov SF, Shelkovnikov YuK. Shooting simulator «Inhibitor»: ballistic "meeting task" software. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2022;20(2):114-127. (In Russ.).

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-2-114-127

34. Egorov SF, Vdovin AYu. Study of the need to use a variable value of the ballistic coefficient when modeling the trajectory of a bullet in a shooting simulator. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika*. 2023;239(2):253-263. (In Russ.).

DOI: 10.18500/1816-9791-2023-23-2-253-263