

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.311.4-52

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ АВТОМАТИКИ ПОДСТАНЦИЙ
ДЛЯ ЗАЩИТЫ МЕЖПОДСТАНЦИОННЫХ ЛИНИЙ***В.В. Окунева, К.Б. Корнеев, Ю.В. Ковалева**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*© Окунева В.В., Корнеев К.Б.,
Ковалева Ю.В., 2021

Аннотация. В статье рассмотрены энергосистемы, которые в настоящее время представляют собой сложные энергосети, включающие большое число подстанций и разветвленную сеть линий электропередачи. Эти линии являются ключевыми компонентами сетей и должны быть защищены для обеспечения целостности и надежности всей системы. Управление и защита оборудования на подстанции прошли долгий путь развития (ручное – аппаратное – автоматизированное – диспетчерское управление и сбор данных – цифровая автоматизация). Текущий стандарт автоматизации подстанций, принятый во всем мире, – это стандарт 61850 Международной электротехнической комиссии (МЭК).

Ключевые слова: цифровая подстанция, защита линии, стандарт МЭК (IEC) 61850, цифровая автоматизация.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-50-58

На современных подстанциях используется микроконтроллерная основа интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ), которая выполняет функции, ранее выполнявшиеся механическими реле. Хотя это и значительно повысило надежность систем защиты и управления, однако по-прежнему имеется несколько проблем, связанных с коммуникацией между приборными трансформаторами (ПТ), ИЭУ и автоматическими выключателями (АВ).

Во-первых, каждое ИЭУ должно быть физически соединено с каждым ПТ и АВ кабелями для приема и передачи сигналов. Во-вторых, протоколы, используемые для такой коммуникации, являются проприетарными, т.е. закрытыми, и разрабатываются конкретным производителем или группой компаний. В связи с этим полезность такой системы сильно зависит от производителей оригинального оборудования (Original Equipment Manufacturer (ОЕМ)), а обновление и/или замена неисправных блоков становятся затруднительными из-за проблем совместимости.

В настоящее время увеличивается количество реализованных проектов цифровых подстанций, поэтому можно определить все преимущества данной технологии.

Подстанция Bradley, расположенная в штате Теннесси, США, стала пилотным проектом. Здесь проверили совместимость устройств, которые могут работать в рамках стандарта МЭК 61850. Все эти устройства были выпущены разными производителями. При этом кроме поставленной задачи, решались задачи повышения совместимости оборудования, а также повышения квалификации персонала энергокомпаний. Одновременно определялись проблемы, возникающие при внедрении стандарта.

Из основных производителей, выпускающих релейные модули, была выбрана компания Siemens, которая предложила программную среду для автоматизации подстанций (SICAM PAS). Вторая программа, DIGSI, предложенная Siemens, в настоящий момент является признанным в мире инструментом для конфигурирования различных устройств по МЭК-61850.

Благодаря многолетнему опыту и наличию большого количества реализованных проектов подстанций, соответствующих стандарту МЭК-61850, компания Siemens встала во главе команды Bradley Project, и это помогло сделать данный проект успешным. Подстанция теперь имеет самую экономичную конструкцию защиты и управления передачей в США.

За счет модернизации были достигнуты поставленные цели: при использовании стандарта МЭК-61850 заметно снизилось количество проводов, компонентов и соединений в системах управления и диспетчеризации подстанции; была продемонстрирована возможность кооперации между поставщиками; уменьшилось количество дорогостоящих сигнальных кабелей и проводов, соединяющих органы управления в диспетчерской и выключатели, расположенные в распределительных устройствах.

На стадии предпусковой наладки подстанции реле SIPROTEC позволили выявить в критически важной инфраструктуре связи проблемы, связанные с оборудованием сторонних производителей и возникавшие при построении системы связи компонентов..

На подстанции Alcala de Henares (Испания) в пробном режиме реализовано внедрение общей шины передачи цифровых данных. Вся информация, собираемая с выключателей и разъединителей, а также датаграммы управления передаются в цифровом виде сообщениями стандарта GOOSE.

На цифровой подстанции Osbaldwick (Великобритания) с точки зрения возникающих задержек при передаче сравнили друг с другом различные методы сбора информации с использованием аналоговых и цифровых первичных измерительных модулей.

По количеству построенных цифровых подстанций к настоящему времени лидирует Китай. При этом следует отметить, что технологии и подходы, которые применяет ПАО «Россети» при строительстве подстанций, сильно отличаются от китайских, и это не позволяет России перенять опыт КНР.

В 2011 г. крупнейшими российскими компаниями (таким как ООО НПП «ЭКРА», ООО «ЭнергопромАвтоматизация» и др.) было подписано генеральное соглашение об организации стратегического сотрудничества с целью объединения научно-технических, инженерных и коммерческих сил для создания цифровых подстанций на территории РФ. В рамках этого соглашения были определены подходы, разработана система автоматизированного проектирования цифровой подстанции, задокументирована требуемая структура внутренней сети для различных вариантов построения подстанции.

Компания «ЭКРА» разработала ряд приборов: устройства сопряжения (УСО), преобразователи тока и напряжения, терминалы релейной защиты, системы синхронизации времени с поддержкой ГЛОНАСС и других протоколов синхронизации.

Программная часть современного комплекса компании «ЭКРА» позволяет реализовать систему управления с оборудованием любых производителей, что упростит задачи системной интеграции. На испытательном полигоне проверили совместимость и соответствие стандарту МЭК-61850 устройств российских и зарубежных фирм, таких как сама «ЭКРА», а также АBB, SATEC, «РАДИУС Автоматика» и др.

Различные опытные проекты, посвященные частичному внедрению элементов цифровой подстанции, в 2013–2018 гг. были реализованы на подстанциях «Чистополь» (Татарстан), «Магистральная» (Тюменская область), «Венец» (Самарская область), «Медведевская» (ПАО «МОЭСК»), Нижегородской гидроэлектростанции.

Международная электротехническая комиссия (МЭК) сформировала целую серию стандартов IEC 61850 для решения вопросов цифровой интеграции, безопасности и надежности.

С внедрением стандарта IEC 61850 «родилась» цифровая подстанция. Компания АBB установила первую такую подстанцию еще в 2009 г. в Австралии. С тех пор фирма создала более 50 цифровых подстанций по всему миру (от Индии до Бразилии).

Цифровые подстанции многочисленны, и можно сэкономить до 80 % медных кабелей, если заменить их волоконной оптикой между силовым оборудованием распределительной станции и релейным помещением. В соответствии с IEC 61850 горизонтальную проводку между защитными и контролируемыми устройствами тоже следует устранить. Количество соединений между первичным устройством и резервными технологическими интерфейсными модулями уменьшится, а медные кабели можно применять только для питания и коротких соединений первичных устройств с распределительными участками на станции.

Если подстанция среднего размера имеет около 7 фидеров, можно сэкономить более 30 т материала, что приведет как к снижению затрат, связанных с транспортировкой, так и к сокращению углеродного следа подстанции. Поскольку в настоящее время больше не нужны обычные вводы-выводы, а устройства требуют гораздо меньше места, в каждую панель можно интегрировать больше устройств. Таким образом, требования к пространству в комнате защиты и управления сократятся вдвое. Интеграция дополнительных функций в устройствах позволяет еще больше уменьшить используемое пространство.

И последнее, пожалуй, самое важное преимущество цифровой подстанции – это высокий уровень безопасности персонала. Так как технологическая шина имеет гальваническую развязку между панелями защиты и распределительным устройством, отпадает необходимость во взаимодействии операторов со вторичными цепями тока и напряжения. Таким образом, риск поражения электрическим током значительно снижается. Цепи тока и напряжения в панелях защиты и управления устраняют, а обычные сигналы постоянного тока 110/220 В заменяют волоконной оптикой.

Многие компании, такие как АBB и Siemens, имеют полный портфель цифровых подстанций: от полевых до технологических, отсековых, станционных, сетевых и операционных уровней.

В стандарте IEC 61850 впервые введено понятие «технологическая шина» (англ. process bus), а также исключена необходимость в дорогостоящей и избыточной медной проводке между отдельными элементами. Кроме того, стандартизированы не только

коммуникационные протоколы, но и форматы данных и системы их обработки, которые каждый поставщик должен был встраивать в ИЭУ для обеспечения интероперабельности и совместимости. Подстанции, которые придерживаются этого стандарта, называются цифровыми. Подробное описание стандарта приведено в источнике [1]. На цифровых подстанциях, как правило, множество точечных медных кабелей заменяется на одну волоконно-оптическую технологическую шину. Сравнение обычной и цифровой подстанций приведено на рис. 1 [2].

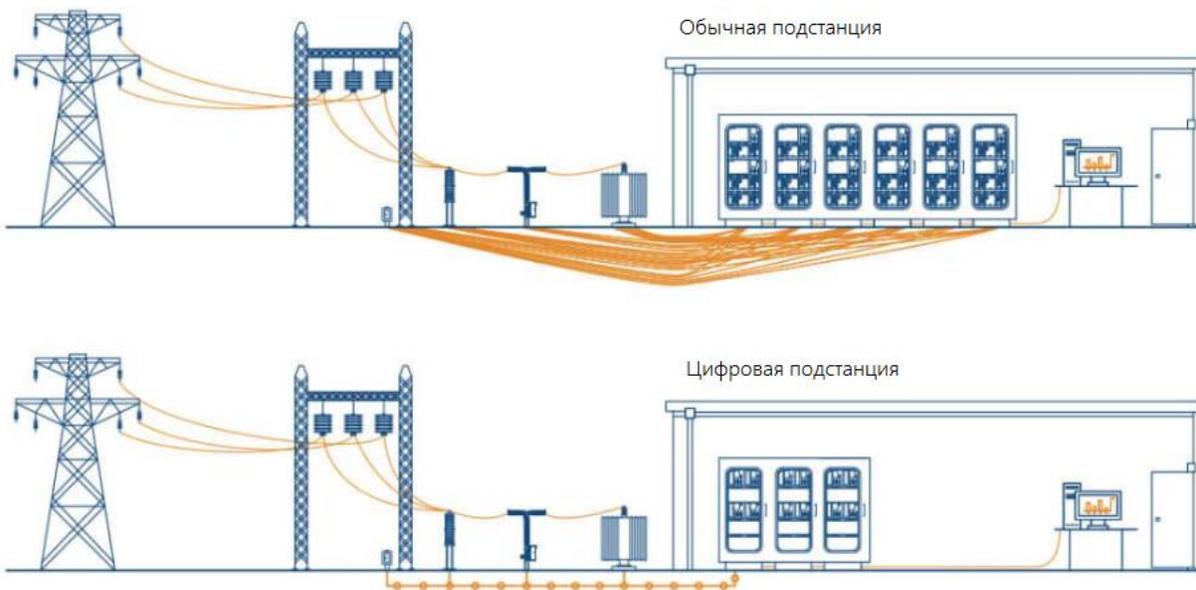


Рис. 1. Компонентное решение и линии передачи информации на подстанциях различного типа

Когда говорят о защите линий электропередачи, приводят два варианта: дистанционную и дифференциальную схемы защиты. Хотя и то и другое имеет свои плюсы и минусы, в настоящее время дифференциальную защиту не слишком часто используют из-за задержек связи и проблем синхронизации. Шире применяют схему дистанционной защиты.

Авторы предлагают провести моделирование и сравнить передачу данных по классической (релейной) и цифровой схемам в специализированной программе (Riverbed Modeler Academic Edition), а также изучить улучшения, которые впоследствии могут быть официально задокументированы, если активно применять стандарт IEC 61850 в отношении элементов схемы, находящихся за пределами подстанции.

Riverbed Modeler в версии Academic Edition – это мощный инструмент моделирования коммуникационных сетей, который имеет некоторые ограничения, свойственные образовательным версиям программных продуктов. Основное внимание в нем уделяется компьютерным коммуникациям, но он позволяет также моделировать пользовательские коммуникационные приложения и протоколы, такие как GOOSE Messages и др.

Цель нашего исследования заключается в том, чтобы сначала смоделировать коммуникационные сети, необходимые для различных схем защиты линий, затем пользовательские приложения, которые будут работать в сети, а после этого выполнить расчетное моделирование и зафиксировать временную задержку доставки критических по времени сообщений (GOOSE и т.п.) по проводным сетям передачи данных (рис. 2).



Рис. 2. Рабочий процесс моделирования

Результаты моделирования показали преимущества дифференциальной защиты линии, особенно при учете стандартов IEC 61850. Применение цифровой связи для линейной дифференциальной защиты повышает надежность системы в целом.

Дистанционная защита в ее нынешнем виде в общем довольно надежна, однако есть проблема с селективностью срабатывания. Особенно это заметно, когда неисправности возникают на удаленных участках зоны. Обеспечение селективности – важная задача, требующая решения.

Использование цифровой связи для дистанционной защиты сократит время восстановления системы после отключения или отказа. Однако применение обычных сетей интернет-провайдеров для обмена сообщениями между подстанциями, которые не являются смежными, невозможно и нецелесообразно для критических по времени данных. Это связано как с задержками, которые могут возникнуть при передаче любых цифровых сигналов (время между отправкой запроса и получением ответа (RTT, от англ.

Round Trip Time) может превышать допустимое для обеспечения надежной защиты от аварийных явлений), так и с вероятностью полной потери данных при передаче.

Таким образом, чтобы полноценно использовать стандарт IEC 61850, нужно не только реализовать на высоком уровне программные или технические аспекты подстанции, но и обеспечить надежную, отказоустойчивую и быструю коммуникацию между всеми компонентами электрических сетей. Данные решения закладываются в современные стандарты связи в рамках реализации концепции «Интернет вещей» (Internet of Things, IoT).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гупта Р.П. Автоматизация подстанций с использованием стандарта IEC61850, 15-я национальная конференция по энергетическим системам (NPSC), Бомбей, декабрь 2008 г.
2. Кунсман С.А. Переход на цифровые технологии: взгляд на современную подстанцию. URL: <https://www.windpowerengineering.com/business-news-projects/going-digital-look-mod-ern-substation> (дата обращения: 30.10.2020).
3. Лю И., Гао Х., Гао В., Ли Н. Сян М. Расчетная схема дифференциальной защиты по току линии на основе IEC61850, конференция IEEE по энергетике и автоматизации, 2011 г. Ухань, 2011. С. 520–523.
4. Фалахати Б., Дараби З., Вакилиан М. Внедрение схем дистанционной защиты линии на подстанциях с поддержкой IEC61850, конференция и выставка IEEE PES T&D, 2014 г. Чикаго; Иллинойс, 2014. С. 1–5.
5. Корнеев К.Б., Окунева В.В., Павлова Ю.М. Открытость и защищенность протоколов передачи критической информации на объектах энергетики // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2019. № 2 (2). С. 50–57.
6. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A., Kechkin A.Y. Optimization of Virtual Power Plant Electrical Network. *IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference ISGT*. 2019. P. 8791638.
7. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Kechkin A.Y. Optimization of Virtual Power Plant with a Distributed Generation. *MATEC Web of Conferences*. 2017. P. 01057.
8. Bakken D., Bose A., Hauser C., Whitehead D., Zweigle G. Smart Generation and Transmission with Coherent, Real-time Data (Special Issue on Smart Grids). *Proc. IEEE*. Vol. 99. No. 6, pp. 928–951.
9. Кечкин А.Ю., Соснина Е.Н., Шалухо А.В. Вопросы создания виртуальных электростанций в масштабе Micro-Grid // *Вестник НГИЭИ*. 2015. № 4 (47). С. 50–55.
10. Уколова Е.В. Виртуальные электростанции – контроль распределенной генерации // *Молодежный вестник ИРГТУ*. 2016. С. 25.
11. Аристова Н.И., Чадеев В.М. Виртуальные электростанции – идеи и решения // *Автоматизация в промышленности*. 2019. № 11. С. 9–13.
12. Денисюк С.П., Базюк Т.Н. Анализ влияния источников распределенной генерации на электросети и особенности построения виртуальных электростанций // *Электрификация транспорта*. 2012. С. 23–28.
13. Суслов К.В. Развитие систем электроснабжения изолированных территорий России с использованием возобновляемых источников энергии // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 5 (124). С. 131–142.

14. Андрианова Л.П. Тенденции развития электроэнергетики на базе распределенной генерации электроэнергии // *Достижения науки и инновации – аграрному производству: материалы национальной научной конференции*. 2017. С. 68–74.
15. Hrochová M. Virtual Power Plant Concept – Idea vs Reality // *Экономика и предпринимательство*. 2016. № 1-1 (66). P. 57–61.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОКУНЕВА Виктория Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

КОРНЕЕВ Константин Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: Energy-tver@mail.ru

КОВАЛЕВА Юлия Владимировна – магистрант кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: kowalyowa.yu@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Окунева В.В., Корнеев К.Б., Ковалева Ю.В. Моделирование цифровой автоматики подстанций для защиты межподстанционных линий // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 50–58.

SIMULATION OF DIGITAL AUTOMATION OF SUBSTATIONS FOR PROTECTION OF INTER-SUBSTATION LINES

V.V. Okuneva, K.B. Korneev, Yu.V. Kovaleva
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Power systems are currently complex power grids, including a large number of substations and an extensive network of power transmission lines. These lines are key components of networks and must be secured to ensure the integrity and reliability of the system. The control and protection of equipment at the substation has evolved from manual to hardware-automated, to dispatcher control and data acquisition with intelligent electronic devices enabled, and finally now to digital automation. The current substation automation standard adopted worldwide is International Electrotechnical Commission (IEC) Standard 61850.

Keywords: digital substation, line protection, IEC 61850 standard, digital automation.

REFERENCES

1. R.P. Gupta, Substation Automation using IEC61850 Standard, 15 National Conference on Energy Systems (NPSC), Bombay, December 2008.

2. S.A. Kunsman. Transition to Digital Technologies: Looking at a Modern Substation. URL: <https://www.windpowerengineering.com/business-news-projects/going-digital-look-modern-substation/> (date of access: 30.10.2020).
3. Liu Y., Gao H., Gao V., Li N., Syan M. IEC61850-based Calculated Line Current Protection Scheme, IEEE Energy and Automation Conference 2011. Wuhan, 2011, pp. 520–523.
4. Falahati B., Darabi Z., Vakilian M. Implementation of Remote Line Protection Schemes in Sub-Stations Supporting IEC61850, IEEE PES T & D 2014 Conference and Exhibition. Chicago; Illinois, 2014, p. 1–5.
5. Korneev K.B., Okuneva V.V., Pavlova Y.M. Openness and Security of Critical Information Transfer Protocols at Energy Facilities. *Bulletin of Tver State Technical University. Series: Construction. Electrical Engineering and Chemical Technology*. 2019. No. 2 (2), pp. 50–57.
6. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A., Kechkin A.Y. Optimization of Virtual Power Plant Electrical Network. *IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference ISGT*. 2019. P. 8791638.
7. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Kechkin A.Y. Optimization of Virtual Power Plant with a Distributed Generation. *MATEC Web of Conferences*. 2017. P. 01057.
8. Bakken D., Bose A., Hauser C., Whitehead D., Zweigle G. Smart Generation and Transmission with Coherent, Real-time Data (Special Issue on Smart Grids). *Proc. IEEE*. Vol. 99. No. 6, pp. 928–951.
9. Kechkin A.Y., Sosnina E.N., Shalukho A.V. Issues of Creating Virtual Power Plants on the Micro-Grid Scale. *Bulletin of NGIEI*. 2015. No. 4 (47), pp. 50–55.
10. Ukolova E.V. Virtual Power Plants – Control of Distributed Generation. *Youth Bulletin of IRSTU*. 2016, p. 25.
11. Aristova N.I., Chadeev V.M. Virtual Power Plants – Ideas and Solutions. *Automation in Industry*. 2019. No. 11, pp. 9–13.
12. Denisyuk S.P., Bazyuk T.N. Analysis of the Influence of Distributed Generation Sources on Electrical Networks and the Features of Building Virtual Power Plants. *Electrification of Transport*. 2012, pp. 23–28.
13. Suslov K.V. Development of Power Supply Systems for Isolated Territories of Russia Using Renewable Energy Sources. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2017. Vol. 21. No. 5 (124), pp. 131–142.
14. Andrianova L.P. Trends in Electricity Development Based on Distributed Electricity Generation. *Achievements of Science and Innovation – Agrarian Production Materials of the National Scientific Conference*. 2017, pp. 68–74.
15. Hrochová M. Virtual Power Plant Concept – Idea vs Reality. *Economics and Entrepreneurship*. 2016. No. 1-1 (66), pp. 57–61.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

OKUNEVA Viktoria Valerjevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

KORNEEV Konstantin Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: energy-tver@mail.ru

KOVALEVA Yuliya Vladimirovna – Graduate Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kowalyowa.yu@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Okuneva V.V., Korneev K.B., Kovaleva Yu.V. Simulation of Digital Automation of Substations for Protection of Inter-substation Lines // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical Engineering and Chemical Technology». 2021. No. 1 (9), pp. 50–58.

УДК 629.7.052

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ МАХОВИК С ИСКУССТВЕННЫМ (ЕМКОСТНЫМ) МОМЕНТОМ ИНЕРЦИИ

И.П. Попов

Курганский государственный университет (г. Курган)

© Попов И.П., 2021

Аннотация. Цель исследования заключается в разработке емкостного маховика с возможностью автоматического регулирования момента инерции. Устройство, имеющее емкостный момент инерции, может очень мало весить и использоваться вместо массивных маховиков. Конструктивно его следует выполнить в виде электрической машины постоянного тока независимого возбуждения или вентильной электрической машины, в якорную цепь которой включен конденсатор. Механическое устройство при взаимодействии с электромагнитным маховиком, обладающим емкостным моментом инерции, «не отличает» его от маховика с «натуральным» моментом инерции, при этом идеализированный вариант первого не имеет гравитационной массы. Емкостный момент инерции функционально зависит от электромагнитных величин – емкости и магнитной индукции, что создает возможность автоматического регулирования момента инерции.

Ключевые слова: масса, момент инерции, электрическая машина, конденсатор.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-1-58-63

ВВЕДЕНИЕ

В классической механике инертная масса m , являющаяся механической величиной, по существу определяется основной аксиомой динамики – вторым законом Ньютона [1]. При этом «натуральная» масса объекта пропорциональна количеству вещества, заключенного в нем.

Под искусственной массой следует понимать величину, которая не отличается от «натуральной» массы, т.е. величину, удовлетворяющую второму закону Ньютона. Инертность искусственной массы обуславливается не количеством вещества, а некими другими физическими обстоятельствами [2, 3].