

AUTOMATED CONTROL OF A ZONAL SPRINKLER FIRE EXTINGUISHING SYSTEM IN ENCLOSED SPACES

Volodya Dzharov

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: volodya.dzharov@mgu.bg
Acad.Emil Djakov Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, 1784 Sofia; E-mail: volodyadzharov@gmail.com*

ABSTRACT: Fires in confined spaces pose a serious threat to people, buildings and technological equipment due to limited evacuation options, intense smoke generation, and rapid spread of high temperatures. The article presents an automated control system for a zone sprinkler fire extinguishing system designed to protect confined spaces. The proposed solution uses multi-sensor monitoring of environmental parameters through temperature, smoke, and gas sensors, with decision-making being carried out using an automated control algorithm. The system provides automatic determination of the affected fire zone and selective activation of the corresponding sprinkler section. The system architecture, control algorithm, and experimental results are presented. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed approach and show the possibility of increasing the reliability and efficiency of automated fire extinguishing systems.

Key words: fire protection, sprinkler system, automation, multisensory detection, zonal control.

АВТОМАТИЗИРАНО УПРАВЛЕНИЕ НА ЗОНАЛНА СПРИНКЛЕРНА ПОЖАРОГАСИТЕЛНА СИСТЕМА В ЗАТВОРЕНИ ПРОСТРАНСТВА

Волюдя Джаров

*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София
Институт по електроника „Акад. Емил Джаков“, Българска академия на науките, 1784 София*

РЕЗЮМЕ. Пожарите в затворени пространства представляват сериозна опасност за хората, сградите и технологичното оборудване поради ограничените възможности за евакуация, интензивното димообразуване и бързото разпространение на високите температури. В статията е представена автоматизирана система за управление на зонална спринклерна пожарогасителна система, предназначена за защита на затворени пространства. Предложеното решение използва многосензорно наблюдение на параметрите на средата чрез температурен, димен и газов сензор, като вземането на решение се реализира чрез алгоритъм за автоматизирано управление. Системата осигурява автоматично определяне на засегнатата пожарна зона и селективно активиране на съответната спринклерна секция. Представени са архитектурата на системата, алгоритъмът на управление и резултатите от проведените експериментални изследвания. Получените резултати потвърждават ефективността на предложения подход и показват възможността за повишаване на надеждността и ефективността на автоматизираните пожарогасителни системи.

Ключови думи: пожарна защита, спринклерна пожарогасителна система, автоматизирано управление, многосензорно откриване на пожар, зонално управление.

I. Въведение

Пожарите в затворени пространства представляват сериозна опасност за хората, сградите и технологичното оборудване. Към тази категория се отнасят подземни паркинги, транспортни тунели, складови помещения, производствени халета, технически помещения и други обекти с ограничени възможности за евакуация и естествена вентилация. При възникване на пожар високите температури и бързото разпространение на дим значително затрудняват евакуацията и увеличават риска от материални щети, поради което се налага използването на надеждни автоматизирани системи за пожарна защита (Кърцелин и др., 2020), (Makedonska et al., 2025).

Автоматичните пожарогасителни системи представляват основен елемент на съвременните средства за активна пожарна защита. Тяхното проектиране, изграждане и експлоатация се регламентират чрез европейски стандарти, въведени като български държавни стандарти (БДС), които определят основните технически и експлоатационни изисквания към тези системи (БДС EN 54-1 – БДС EN 54-31, 2020).

През последните години се наблюдава интензивно развитие на автоматизираните системи за откриване и пожарогасене. Наред с традиционните решения все по-широко приложение намират интелигентни методи, базирани на компютърно зрение, обработка на

изображения и многосензорен анализ, които повишават надеждността на откриване и намаляват времето за реакция при възникване на пожар (Gurung et al. 2024).

Съществено място в съвременните пожарогасителни инсталации заемат стационарните спринклерни системи, чиито конструктивни особености, проектиране, монтаж и експлоатация са регламентирани в действащите стандарти и технически нормативни документи (БДС EN 12259-1, 2006; БДС EN 12845, 2020; БДС EN 671-1, 2002; NFPA 13), European Committee for Standardization (2018).

Съвременните тенденции в развитието на противопожарните системи са насочени към внедряване на автоматизирано управление, многосензорно откриване на пожар и интелигентни алгоритми за вземане на решения. Разработват се системи, използващи програмируеми микроконтролерни платформи и различни комбинации от сензори за ранно откриване и локализиране на пожарните събития (Sathiabalan et al. 2021).

Анализът на литературните източници показва, че въпреки значителния напредък в областта на автоматичните пожарогасителни системи, изследванията, свързани с автоматизираното управление на зонални спринклерни системи в затворени пространства, все още са ограничени. Това налага разработването на системи, които съчетават многосензорно откриване на пожар, автоматично определяне на засегнатата зона и селективно управление на пожарогасителния процес. Комбинираното използване на температурни, димни и пламъчни (или газови, ако това е

използвано в своята разработка) сензори повишава достоверността при откриване на пожар и позволява своевременно активиране на съответната пожарогасителна зона (Alqourabah et al., 2021).

Различните подходи за автоматично пожарогасене включват системи с чисти пожарогасителни агенти, водна мъгла, инертни газове и водни спринклерни системи. Сред тях спринклерните пожарогасителни системи се отличават с висока надеждност, сравнително проста конструкция и възможност за бързо локализиране на пожара, поради което намират широко приложение при защитата на затворени пространства (Milanoski 2021).

През последните години значителен интерес представлява използването на методи на размитата логика, безжични сензорни мрежи, технологии на Интернет на нещата (IoT) и алгоритми с елементи на изкуствен интелект за прогнозиране на пожарния риск, наблюдение на параметрите на средата и подпомагане на процеса на вземане на решения в автоматизирани пожарогасителни системи (Basu et al., 2019; Saxena et al., 2025; AlQahtani et al., 2025).

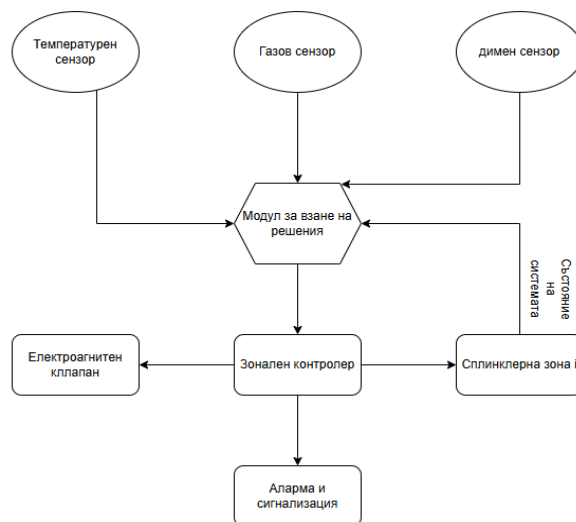
Тези технологии създават предпоставки за разработването на интелигентни системи, осигуряващи висока надеждност, по-бърза реакция и възможност за дистанционен мониторинг и управление на противопожарните инсталации.

В настоящата статия е представена разработена автоматизирана система за управление на зонална спринклерна пожарогасителна система в затворени пространства. Предложеното решение използва много-сензорно наблюдение чрез температурен, димен и газов сензор, като въз основа на разработен алгоритъм се определя режимът на работа на системата и се активира съответната пожарогасителна зона. Представени са архитектурата на системата, алгоритъмът за управление и резултатите от проведените експериментални изследвания.

II. Архитектура на разработената система

Разработената автоматизирана система е предназначена за управление на зонална спринклерна пожарогасителна система в затворени пространства. Основната ѝ задача е да осигури своевременно откриване на пожар, определяне на засегнатата зона и автоматично управление на съответната пожарогасителна секция. При изграждането на системата е използван модулен принцип, който позволява лесно разширяване и адаптиране към различни обекти и експлоатационни условия. Архитектурата включва модул за събиране на данни от температурен, димен и газов сензор, управляващ контролер, модул за обработка и анализ на получената информация, изпълнителни механизми за управление на електромагнитните клапани и модул за звукова и светлинна сигнализация. На фиг. 1 е представена архитектурата на разработената автоматизирана система за управление.

Както се вижда от фиг. 1, информацията от трите типа сензори постъпва към управляващия контролер, където се обработва съгласно разработения алгоритъм за управление.



Фиг. 1. Архитектура на автоматизирано управление на зонална спринклерна пожарогасителна система в затворени пространства.

В зависимост от измерените стойности и предварително зададените прагове, системата определя текущото състояние на защитавания обект и автоматично преминава в нормален, предупредителен или аварийен режим на работа. При установяване на пожар се активира единствено спринклерната секция, съответстваща на засегнатата зона, като едновременно с това се включват средствата за звукова и светлинна сигнализация.

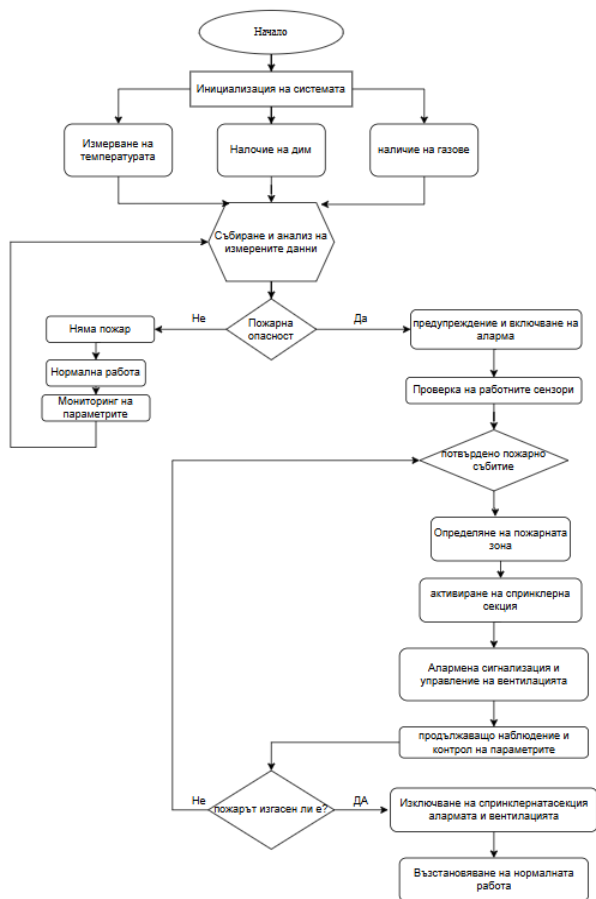
Предложеният подход позволява ограничаване на пожарогасителното въздействие само до зоната, в която е възникнал пожарът, което допринася за намаляване разхода на вода, ограничаване на вторичните материални щети и повишаване ефективността на пожарогасителната система.

III. Алгоритъм за управление на зоналната спринклерна пожарогасителна система

Ефективността на разработената автоматизирана система се определя от алгоритъма за управление, който осигурява непрекъснато наблюдение на състоянието на защитаваното пространство, обработка на информацията от сензорите и автоматично вземане на решение за активиране на съответната пожарогасителна зона. Алгоритъмът е разработен с цел осигуряване на надеждно откриване на пожар, минимизиране на вероятността от фалшиви сработвания и ограничаване на пожарогасителното въздействие само до засегнатата зона.

На фиг. 2 е представена блоковата схема на разработения алгоритъм за управление.

Както се вижда от фиг. 2, след инициализиране на системата се извършва непрекъснато измерване на параметрите на средата чрез температурен, димен и газов сензор. Получените данни се сравняват с предварително зададени прагови стойности, въз основа на които се определя текущият режим на работа на системата.



Фиг. 2. Блокова схема на алгоритъма за автоматизирано управление на зонална спринклерна пожарогасителна система

При липса на отклонения, системата функционира в нормален режим като осъществява непрекъснат мониторинг на наблюдаваните параметри. При регистриране на стойности, достигащи предварително определените предупредителни прагове, системата преминава в предупредителен режим, при който се активира звукова и светлинна сигнализация и се извършва повторна проверка на входните данни.

При едновременно потвърждение на пожарното събитие чрез анализ на измерените параметри, системата

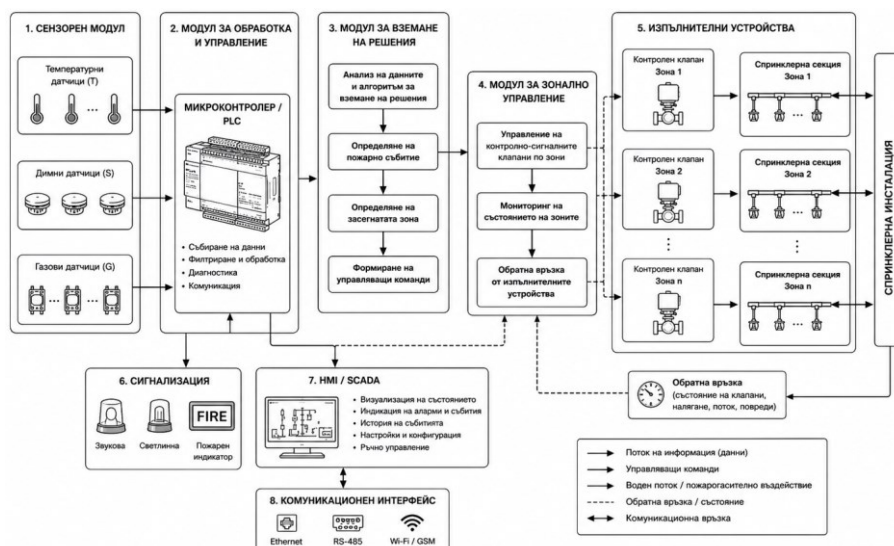
преминава в аварийен режим, при който автоматично се активира електромагнитният клапан на съответната спринклерна зона и се включват средствата за аварийна сигнализация. След отстраняване на причините за аварийното състояние системата се връща към нормален режим и възстановява непрекъснатия мониторинг на защитаваното пространство.

Разработеният алгоритъм осигурява последователна обработка на входната информация, надеждно определяне на пожарното събитие и селективно управление на отделните пожарогасителни зони, което повишава ефективността на системата и намалява вероятността от нежелани сработвания.

Комбинираният анализ на информацията от температурния, димния и газовия сензор повишава достоверността при откриване на пожар и позволява значително намаляване на вероятността от фалшиви сработвания в сравнение със системи, използващи само един тип датчик.

IV. Експериментално изследване на автоматизираната зонална спринклерна пожарогасителна система

За реализиране на експерименталната автоматизирана система е приложен модулнен принцип на изграждане, при който отделните функционални задачи са разпределени между взаимосвързани модули. Сензорният модул осигурява непрекъснато наблюдение на параметрите на средата, а получената информация постъпва в управляващия контролер за обработка и анализ. Въз основа на измерените стойности и предварително зададените прагови условия се определят текущото състояние на системата, засегнатата пожарна зона и необходимото управляващо въздействие. Управляващите сигнали се подават към съответните изпълнителни устройства и средствата за сигнализация, като едновременно с това се осигуряват визуализация, комуникация и обратна връзка за състоянието на системата. Модулният принцип на работа на експерименталната автоматизирана зонална спринклерна пожарогасителна система е представен на фиг. 3.



Фиг. 3. Функционално-модулна структура на експерименталната автоматизирана зонална спринклерна пожарогасителна система

Както се вижда от фиг. 3, системата е организирана в последователно свързани функционални модули, осигуряващи целия процес от регистрирането на параметрите на средата до формирането и изпълнението на управляващото въздействие. Информацията от температурните, димните и газовите датчици се обработва от микроконтролерния модул, след което модулът за вземане на решение определя режима на работа и засегнатата пожарна зона. Модулът за зонално управление формира управляващите сигнали към съответните електромагнитни клапани и спринклерни секции. Системата включва също средства за звукова, светлинна и пожарна сигнализация, HMI/SCADA визуализация и комуникационен интерфейс. Обратната връзка от изпълнителните устройства позволява контрол на тяхното състояние и потвърждаване на изпълнените управляващи команди.

За оценяване на работоспособността на системата са проведени експериментални изследвания при три основни режима на работа – нормален, предупредителен и аварийен. Обобщените състояния на системата при отделните режими са представени в табл. 1.

Таблица 1. *Режими на работа и състояние на автоматизираната зонална спринклерна пожарогасителна система*

Режим	Температура	Дим	Газ	Аларма	Спринклер
Нормален	$T < T_{кр}$	Не	Не	Не	Не
Предупредителен	$T \approx T_{кр}$	Да	Не	Да	Не
Аварийен	$T > T_{кр}$	Да	Да	Да	Да

От данните, представени в табл. 1, се установява, че разработената автоматизирана зонална спринклерна пожарогасителна система функционира в три основни режима – нормален, предупредителен и аварийен. В нормален режим всички наблюдавани параметри се намират в допустимите граници и системата осъществява непрекъснат мониторинг без активиране на изпълнителните механизми. При регистриране на стойности, достигащи предварително зададените предупредителни прагове, се активира звукова и светлинна сигнализация, като системата продължава да извършва наблюдение и повторна оценка на входните данни. При потвърдено пожарно събитие алгоритъмът преминава в аварийен режим, при който автоматично се задейства електромагнитният клапан на съответната спринклерна зона и се активира пожарогасителният процес.

За по-детайлна оценка на работата на разработената система са проведени експериментални изпитвания при различни комбинации на входните параметри. Получените резултати при нормална работа са представени в табл. 2.

Таблица 2. *Измерени параметри и състояние на системата при нормален режим на работа*

Параметър	Стойност	Състояние
Температура	24°C	Нормална
Газ	Под прага	Безопасно
Дим	0	Няма дим
Аларма	Изключена	Изключена

Данните в табл. 2 показват, че при нормален режим на работа всички контролирани параметри се намират в допустимите граници. Температурата е значително под критичната стойност, не се регистрира наличие на дим, а концентрацията на газ е под зададения праг на безопасност. При тези условия алармената сигнализация и спринклерната секция остават неактивни, а системата продължава да функционира в режим на непрекъснат мониторинг.

При регистриране на стойности, близки до предварително зададените прагове, системата преминава в предупредителен режим. Резултатите от изпитването при този режим са представени в табл. 3.

Резултатите, представени в табл. 3, показват, че при достигане на предварително зададените предупредителни прагове системата своевременно преминава в предупредителен режим. В този режим се активират светлинната и звуковата сигнализация, без да се задейства спринклерната пожарогасителна система. Това позволява ранно известяване за потенциална опасност и предоставя възможност за предприемане на превантивни действия преди възникването на реално пожарно събитие. По този начин се намалява вероятността от ненужно задействане на пожарогасителната система и се повишава надеждността на нейното функциониране.

Таблица 3. *Измерени параметри и състояние на системата при предупредителен режим*

Параметър	Стойност	Състояние
Температура	48°C	Близо до критичната
Газ	Под прага на безопасност	Контролирано
Дим	Наличие на дим	Предупреждение
Аларма	Включена	Активна
Спринклер	Изключен	Неактивен

При едновременно регистриране на стойности, надвишаващи зададените аварийни прагове, системата автоматично преминава в аварийен режим, при който се активира съответната спринклерна зона. Резултатите от проведените експериментални изследвания при този режим са представени в табл. 4.

Таблица 4. *Измерени параметри и състояние на системата при аварийен режим*

Параметър	Стойност	Състояние
Температура	65°C	Над критичната
Газ	Над прага на безопасност	Опасно
Дим	Наличие на дим	Пожар
Аларма	Включена	Активна
Спринклер	Включен	Активен

Резултатите, представени в табл. 4, показват, че при едновременно регистриране на стойности, надвишаващи предварително зададените аварийни прагове, разработената система надеждно идентифицира възникването на пожарно събитие и автоматично

преминава в аварийен режим на работа. В резултат на това се активира електромагнитният клапан на съответната спринклерна зона, включват се звуковата и светлинната сигнализация и се осигурява своевременно започване на пожарогасителния процес. Проведените експериментални изследвания потвърждават, че алгоритъмът за многосензорно управление осигурява надеждно вземане на решение, бърза реакция на системата и селективно управление на засегнатата пожарна зона.

Обобщените резултати от проведените експериментални изследвания потвърждават правилното функциониране на разработената автоматизирана система при всички изследвани режими на работа. Комбинираното използване на температурен, димен и газов сензор повишава надеждността при откриване на пожар, а предложенят алгоритъм осигурява своевременно и селективно управление на спринклерната пожарогасителна система. Получените експериментални резултати са в съответствие с други изследвания, при които системи, базирани на Arduino UNO, демонстрират висока надеждност при откриване и автоматизирано потушаване на пожар в реално време (Raquin et al., 2026). Резултатите също показват, че разработеното решение е приложимо за защита на различни затворени пространства и създава предпоставки за повишаване на ефективността на автоматизираните пожарогасителни системи.

Заклучение

В настоящата статия е представена разработка на автоматизирана система за управление на зонална спринклерна пожарогасителна система, предназначена за защита на затворени пространства. Предложената система използва комбинирана обработка на информацията от температурен, димен и газов сензор, което осигурява надеждно откриване на пожарни събития и автоматично определяне на засегнатата пожарна зона.

Разработеният алгоритъм за управление реализира последователна обработка на входните данни и автоматично превключване между нормален, предупредителен и аварийен режим на работа. Благодарение на селективното управление на спринклерните секции се осигурява локализиране на пожарогасителното въздействие само в засегнатата зона, което допринася за намаляване на разходана вода и ограничаване на вторичните материални щети.

Проведените експериментални изследвания потвърждават работоспособността на разработената система и ефективността на предложения алгоритъм при различни режими на работа. Получените резултати показват, че комбинираният анализ на информацията от използваните сензори повишава надеждността при откриване на пожар и намалява вероятността от фалшиви сработвания.

Разработеното решение може да бъде използвано като основа за изграждане на интелигентни автоматизирани системи за пожарна защита на подземни паркинги, транспортни тунели, складови помещения, производствени сгради и други затворени пространства, като бъдещо направление на изследването се предвижда интегриране на технологии от типа интернет на нещата (iot), безжични сензорни мрежи и алгоритми с елементи на изкуствен

интелект за повишаване на функционалността и ефективността на системата.

Благодарности. Настоящото изследване е финансирано по договор **МЕМФ № 184-30.03.2026** г., със средства от държавния бюджет за присъщата научна дейност на държавните висши училища.

Литература

- AlQahtani, A. A. S., et al. (2025). *A comprehensive review and bibliometric analysis of IoT-based fire safety systems*. *Fire*, 11(2).
- Alqourabah, H., Muneer, A., & Fati, S. M. (2021). A smart fire detection system using IoT technology with automatic water sprinkler. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(4), 2994–3002. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i4.pp2994-3002>
- Basu, S., Pramanik, S., Dey, S., Panigrahi, G., & Jana, D. K. (2019). Fire monitoring in coal mines using wireless underground sensor network and interval type-2 fuzzy logic controller. *International Journal of Coal Science & Technology*.
- European Committee For Standardization. (2018). *EN 54-14: Fire detection and fire alarm systems – guidelines for planning, design, installation, commissioning, use and maintenance*.
- Gurung, K., Maharjan, S. R., Pokhrel, S., Sigdel, Y., & Bhatta, B. (2024). Fire detection and extinguishing system. *International Journal on Engineering Technology*, 2(1), 60–70.
- Makedonska, D., Vladkova, B., Kostadinova, N., Dinchev, Z., & Valev, B. (2025). Design and construction of a stand for sprinkler nozzle testing. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”*, 68.
- National Fire Protection Association. (2022). *NFPA 13: Standard for the installation of sprinkler systems*.
- Raquin, E. F., Ramirez, A. P., Meredor, K. R., Francisco, A. M., Guillena, K. N., & Fabro, B. C. (2026). Automated fire suppression system. *International Journal of Research and Scientific Innovation*, 13(1), 661–674. <https://doi.org/10.51244/IJRSI.2026.13010057>
- Sathiabalan, N. A., et al. (2021). Autonomous robotic fire detection and extinguishing system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2107.
- Saxena, K., Kalyan, N. B., Aswath, A., et al. (2025). Real-time monitoring of underground mines with IoT and machine learning integration. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 73(6), 1559–1568.
- Кърцелин, Е., Александров, Р., & Върбов, Ц. (2020). Използване на rcd устройствата като противопожарни средства. В *Proceedings Of National Scientific And Technical Conference With International Participation “Automation in Mining Industry and Metallurgy” (BULCAMC'20)*.
- Миланоски, М. (2021). *TCMB112 Инфраструктурно изграждане на мрежи*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28625.15205>
- БДС EN 54-1 – БДС EN 54-31. Пожароизвестителни системи. Съставни части на пожароизвестителни системи и системи за управление на дим и топлина. Български институт за стандартизация.

БДС EN 12259-1:1999+A1:2001+A3:2006. стационарни пожарогасителни инсталации. съставни части на спринклерни и инсталации за разпръскване на вода. част 1: спринклери. Български институт за стандартизация.

БДС EN 12845:2015+A1:2020. стационарни пожарогасителни инсталации. автоматични

спринклерни инсталации. проектиране, монтиране и поддържане. Български институт за стандартизация.

БДС EN 671-1:2002. стационарни противопожарни инсталации. инсталации с маркуч. част 1: макари с полутвърд маркуч. Български институт за стандартизация.