

Научная статья

УДК 004.732, 679.745.52

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-36-45>

EDN:ETTGOL



Предельная протяженность линии с PoE-репитерами

✉ **Мария Сергеевна Былина**¹, bylina.maria@sut.ru
✉ **Сергей Федорович Глаголев**¹, Glagolev.Sergey@sut.ru
✉ **Андрей Борисович Семенов**², andre52.55@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

²Научно-исследовательский университет Московский государственный строительный университет, Москва, 129337, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность: В состав современных внутриобъектовых информационно-телекоммуникационных систем входят подсистемы, использующие технологию Ethernet. К ним относятся IP-телефония, точки доступа Wi-Fi, системы видеонаблюдения, системы контроля и управления доступом, сенсорные системы интеллектуального пространства, включающие датчики и исполнительные устройства интернета вещей, и т. п. Питание многих подсистем может осуществляться централизованно от коммутаторов и инжекторов Ethernet по технологии PoE (аббр. от англ. Power over Ethernet – передача питания по сети Ethernet). Для увеличения расстояния до терминалов используются репитеры или удлинители PoE.

Постановка задачи. При проектировании линии внутриобъектовой связи, сегменты которой соединены друг с другом через PoE-репитеры, необходимо определять ее предельную протяженность. Методика расчета предельной протяженности линии с PoE-репитерами не представлена в известных источниках.

Цель работы: разработка инженерного метода определения максимальной протяженности линии внутриобъектовой связи с применением PoE-репитеров. В качестве входных параметров используются шлейфовое сопротивление витой пары, напряжение источника, мощность собственного потребления репитера и мощность потребления питаемого терминального устройства. Отдельные сегменты такой структуры считаются однотипными, а в отношении параметров линейного тракта и применяемого активного оборудования действуют ограничения спецификаций IEEE 802.3af и IEEE 802.3at.

Новизна: разработана математическая модель последовательно включенных участков линии внутриобъектовой связи, связанных друг с другом через PoE-репитеры.

Практическая значимость: определены предельные возможности PoE-репитеров и показано влияние их собственной мощности потребления на максимальную протяженность линии. Разработанный метод расчета может быть использован для проектирования составных частей внутриобъектовых информационно-телекоммуникационных систем. Предложенная модель, методика расчета и ее исследование могут быть использованы в учебном процессе СПбГУТ и других университетов телекоммуникаций.

Ключевые слова: информационно-телекоммуникационная система, структурированная кабельная система, локальная вычислительная сеть, информационная технология Ethernet, PoE (Power over Ethernet), PoE-репитер (удлинитель), кабель из витых пар, кабельный тракт, маломощное терминальное оборудование

Ссылка для цитирования: Былина М.С., Глаголев С.Ф., Семенов А.Б. Предельная протяженность линии с PoE-репитерами // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 1. С. 36–45. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-36-45. EDN:ETTGOL

Original research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-36-45>
EDN:ETTGOL

The Maximum Length of a Line with PoE Repeaters

✉ **Maria S. Bylina**¹, bylina.maria@sut.ru
Sergey F. Glagolev¹, Glagolev.Sergey@sut.ru
Andrey B. Semenov², andre52.55@mail.ru

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
Moscow, 119454, Russian Federation

Annotation

Relevance: Modern intra-facility information and telecommunication systems include subsystems utilizing Ethernet technology. These include IP telephony, Wi-Fi access points, video surveillance systems, access control and management systems, smart environment sensor systems comprising Internet of Things sensors and actuators, etc. Power for many subsystems can be supplied centrally from Ethernet switches and injectors using Power over Ethernet (PoE) technology. PoE repeaters or extenders are used to increase the distance to terminal devices.

Problem Statement. When designing an intra-facility communication line whose segments are interconnected via PoE repeaters, it is necessary to determine its maximum length. A methodology for calculating the maximum length of a line with PoE repeaters is not presented in known sources.

Objective: To develop an engineering method for determining the maximum length of an intra-facility communication line using PoE repeaters. The input parameters are the loop resistance of the twisted pair, the source voltage, the self-consumption power of the repeater, and the power consumption of the powered terminal device. Individual segments of such a structure are considered identical, and constraints from the IEEE 802.3af and IEEE 802.3at specifications apply regarding linear path parameters and active equipment used.

Novelty: A mathematical model of serially connected sections of an intra-facility communication line, interconnected via PoE repeaters, has been developed.

Practical Significance: The limitations of PoE repeaters are determined, and the influence of their self-consumption power on the maximum line length is shown. The developed calculation method can be used for designing components of intra-facility information and telecommunication systems. The proposed model, calculation methodology, and its investigation can be used in the educational process at SPbSUT and other telecommunication universities.

Keywords: Information and telecommunication system, structured cabling system, local area network (LAN), Ethernet technology, PoE (Power over Ethernet), PoE repeater (extender), twisted-pair cable, cable path, low-power terminal equipment

For citation: Bylina M.S., Glagolev S.F., Semenov A.B. The Maximum Length of a Line with PoE Repeaters. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(1):36–45. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-36-45. EDN:ETTGOL

На подавляющем большинстве современных объектов промышленного и гражданского строительства, где постоянно или длительное время присутствуют люди, наряду с такими классическими инженерными системами, как водопровод, канализация, вентиляция и т. д., создается информационно-телекоммуникационная система (ИТС). Она предоставляет подключенным к ней пользо-

вателям услуги локальной вычислительной сети (ЛВС) и сети телефонной связи, а в последнее время – систем видеонаблюдения, систем контроля и управления доступом (СКУД), систем Wi-Fi беспроводного доступа к сети Интернет и аналогичными. В силу ряда причин физический уровень вновь вводимых в состав ИТС отдельных систем реализуется на базе структурированной кабельной си-

стемы (СКС) или же с активным использованием ее элементной базы [1–3]. Как технический объект, СКС нормируется международными, региональными и национальными стандартами. В качестве примеров таких нормативных документов можно сослаться на международные документы ISO/IEC 11801, ANSI/TIA/EIA-568 и отечественный стандарт ГОСТ Р 56602-2015, соответственно.

Для значительной части вновь вводимых в эксплуатацию внутриобъектовых ИТС систем характерно [1–3]:

- организация информационного обмена с использованием технических средств локальной сети Ethernet;

- выраженное тяготение к централизованной схеме построения, что проявляется, в первую очередь, в отношении систем, требующих защиты от несанкционированного доступа;

- наличие требования сохранения работоспособности при отказах общей системы электропитания объекта недвижимости.

С другой стороны, терминальное оборудование таких систем отличается: 1) сравнительно невысоким быстродействием (в большинстве случаев скорость передачи не превышает 100 Мбит/с); 2) небольшой потребляемой мощностью (обычно менее 10 Вт); 3) малой плотностью размещения по обслуживаемой площади в сочетании с большой зоной покрытия; 4) необходимостью обеспечения в ряде случаев дальности действия свыше 100 м, что является прямым следствием явно выраженного тяготения к централизованным схемам построения.

Организация электропитания терминальных устройств ИТС

Электропитание терминальной техники ИТС может быть организовано по двум основным схемам. В случае классической схемы выполняется подключение блока питания к выделенной для этого розетке напряжения 220 В переменного тока (рисунок 1). Альтернативный вариант – с питанием постоянным током от группового источника по известному из классической телефонии принципу с центральной батареей выполняется с привлечением технологии PoE (аббр. от англ. Power over Ethernet – передача питания по сети Ethernet). Подобная схема применима в случае небольших мощностей терминальной техники и популярна для устройств цифрового потолка в офисах и различных технологических систем на производстве [4]. Источник питающего напряжения постоянным током в этом случае чаще всего выполняется в форме блока коммутатора ЛВС или инжектора PoE.

Техника, реализующая технологию PoE, дополнительно выгодна также тем, что предполагает подключение входящего в ее состав источника к сети 220 В. Это дает возможность с необходимым

уровнем эффективности решить проблему поддержки работоспособности ИТС при общем или локальном отказе системы электроснабжения объекта недвижимости простым применением типовых источников бесперебойного питания (ИБП) [5].

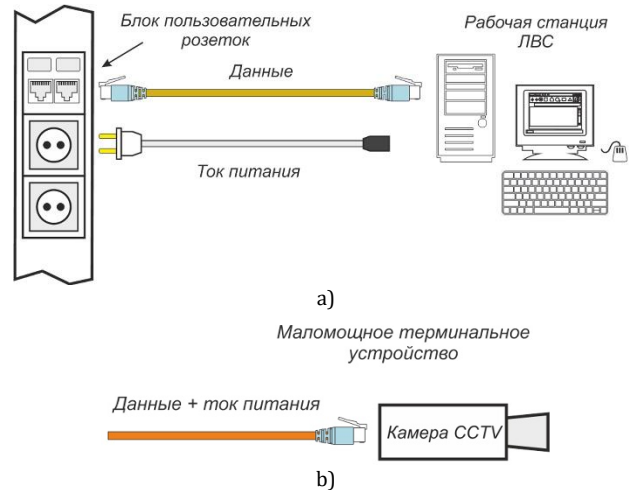


Рис. 1. Варианты организации электропитания терминального оборудования ИТС в случае применения классической конфигурации блока пользовательских розеток (а) и обращения к технологии PoE (б)

Fig. 1. Options for Organizing Power Supply to Terminal Equipment of an IT System Using the Classic User Outlet Block Configuration (a) and Employing PoE Technology (b)

Терминальное устройство может быть подключено также по однопарной схеме питания [6], которая в последнее время быстро набирает популярность в связи с развитием технологии интернета вещей (IoT, аббр. от англ. Internet of Things) и систем автоматического управления инженерным обеспечением здания [7]. В этом случае применяется похожая на PoE – технология PoDL (аббр. от англ. Power over Data Line – передача питания по линии одновременно с данными) [8, 9]. Функциональная близость технологий позволяет в дальнейшем ограничиться только анализом использования PoE.

Аналогичным образом за пределами рассмотрения оставляется новейшая техника FMP (аббр. от англ. Fault Managed Power – управление питанием при неисправностях), которая предназначена для использования при расстояниях до 4 км и мощностях потребления подключаемого оборудования свыше сотни Вт [10].

При прочих равных условиях более предпочтительной является классическая технология PoE, которая не требует дополнительных затрат для организации линейной части системы. Принципиальным недостатком этой технологии является ограниченная дальность действия, которая задается датчиком контроля сопротивления шлейфа витых пар, входящего в состав контроллера ин-

жектора PoE и блокирующего работу источника в случае превышения определенного порогового значения (40 Ом для оборудования IEEE 802.3af и 25 Ом для более мощного оборудования PoE+ и PoE++). Отметим в этой связи, что для современных инжекторов PoE, формально соответствующих спецификации IEEE 802.3af, из соображений обеспечения единообразия с используемой также в сетевых интерфейсах ЛВС элементной базы характерно применение 25-омных шлейфов.

Максимальная дальность действия оборудования PoE является критически важным параметром для систем с централизованной топологией. В качестве оценки этого параметра можно исходить из того, что для кабелей категории 5е с диаметром токопроводящей жилы витых пар 0,52 мм она составляет 100 м. В случае реализации линейной части физического уровня системы на так называемых PoE-кабелях диаметр увеличивается до максимально возможных 0,64 мм без уменьшения шага скрутки, которое характерно для изделий более высоких категорий. Это сопровождается уменьшением шлейфового сопротивления и позволяет нарастить дальность связи как минимум до 151 м:

$$L = (0,64/0,52)^2 \cdot 100 = 151 \text{ м.}$$

Для дальнейшего наращивания дальности связи в состав линии вводятся PoE-репитеры (удлинители).

Схема организации электропитания удаленных устройств с помощью PoE-репитеров

PoE-Репитер выполняет две функции:

- 1) принимает ослабленное в линейном тракте PoE-питание и генерирует новое PoE-питание с заданным значением выходного напряжения U_0 ;
- 2) принимает, усиливает и регенерирует информационный сигнал Ethernet (данные).

В данной работе рассматривается только первая функция, для выполнения которой репитер содержит два блока – источник PoE-питания PSE (аббр. от англ. Power Sourcing Equipment) и приемник PoE-питания PD (аббр. от англ. Powered Device). На рисунке 2 представлены два варианта схемы организации питания по технологии PoE с использованием фантомных цепей, которые образуются выделенными для питания (свободными – spare pairs) парами в кабеле [11] или теми же парами, по которым передаются сигналы Ethernet (сигнальными – signal pairs) [12]. Проводники фантомных цепей питания образуются параллельно соединенными проводниками витой пары. Подключение к сигнальным парам осуществляется через средние точки трансформаторов.

На вход PD поступает постоянное напряжение из цепи питания, величина которого зависит от длины и погонного сопротивления проводников, от энергопотребления репитера и его полного сопротивления нагрузки, которое в общем случае является нелинейным. Кроме того, на входе PD устанавливается диодный мост-выпрямитель, обеспечивающий правильную полярность напряжения на его выходе независимо от полярности напряжения на входе и исключая ошибки монтажа. Напряжение с выхода диодного моста поступает на преобразователь (DC/DC) постоянного входного напряжения в постоянное выходное напряжение, которое обеспечивает питание схем PD и PSE.

PSE содержит контроллер, который реализует типовой протокол преобразования заранее неизвестного входного напряжения репитера в требуемое выходное напряжение U_0 . Одной из важных функций контроллера является проверка соответствия шлейфового сопротивления фантомных цепей передачи тока дистанционного питания максимально допустимому значению.

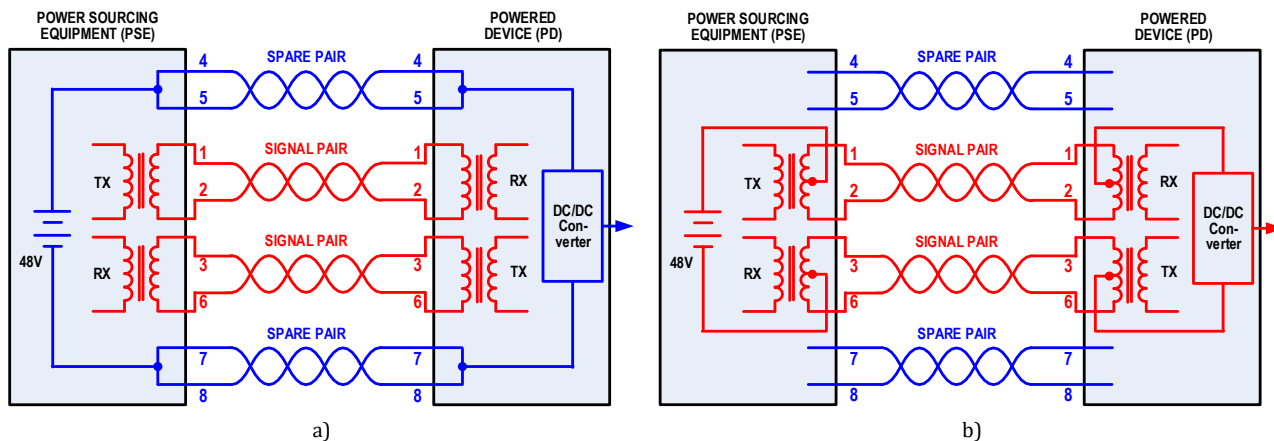


Рис. 2. Организация питания по технологии PoE: по свободным (а) и сигнальным (б) парам
 Fig. 2. PoE Power Delivery Organization: Over Spare Pairs (a) and Over Signal Pairs (b)

Для обеспечения работоспособности репитера расходуется часть электрической мощности, поступающей на него из фантомной линии, что снижает максимально отдаваемый репитером ток [13]. Сильная сторона PoE-репитеров связана с тем, что их применение не исключает выдачи гарантии на кабельную систему. Это определяется тем, что репитер представляет собой один из компонентов неоднородного тракта, создание которых допускается всеми без исключения стандартами СКС, в т. ч. их ранними редакциями [14, 15].

Максимальное количество PoE-репитеров в линейном тракте, соединяющем инжектор с нагрузкой, ограничено. Процедуры расчета максимального количества репитеров, которое определяет предельную протяженность организуемого тракта, не представлены в известных литературных источниках. Обсуждаемый далее метод устраняет этот недостаток.

Модель линии передачи дистанционного питания

Терминальная техника, применяемая при построении централизованных структур отдельных систем, входящих в состав ИТС, отличается умеренной мощностью потребления и разделяется на классы. В таблице 1 приведены параметры типовых устройств, использующих технологию PoE и PoE+ в соответствии с рекомендациями IEEE 802.3af и IEEE 802.3at.

Согласно собранной авторами статистике порядка 2/3 реальных PoE-устройств относятся к классу 1, т.е. потребляют мощность не свыше 3,84 Вт (рисунок 3). Классы выше 4-го (см. таблицу 1) не отражены, так как их доля на рынке составляет менее 10 %.

ТАБЛИЦА 1. Параметры терминальных устройств, использующих технологию PoE и PoE+

TABLE 1. Parameters of Terminal Devices Using PoE and PoE+ Technologies

Рекомендация IEEE	Класс	Мощность PSE, Вт	Напряжение PSE, В	Мощность PD, Вт	Максимально возможный ток, мА	Типичные устройства
802.3af/at, PoE	0	15,4	48 (44-57)	12,95	350	Устройства без явной классификации (универсальные)
802.3af/at, PoE	1	4,0		3,84		IP-телефоны, датчики, простые контроллеры
802.3af/at, PoE	2	7,0		6,49		Камеры без PTZ, простые Wi-Fi точки
802.3af/at, PoE	3	15,4		12,95		Wi-Fi 4 (802.11n), VoIP
802.3at, PoE+	4	30,0	50 (44-57)	25,5	600	Wi-Fi 5 (802.11ac), PTZ IP-камеры, мини-ПК

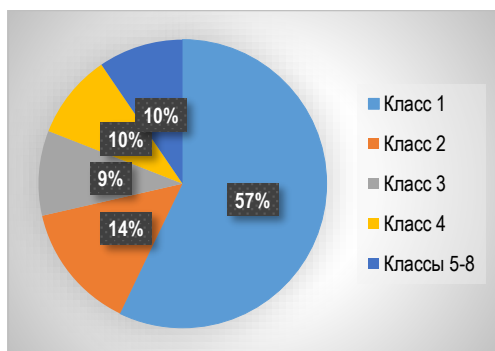


Рис. 3. Распределение количества реально используемых PoE-устройств по классам

Fig. 3. Distribution of the Number of Actually Used PoE Devices by Class

Данная особенность позволяет по крайней мере потенциально использовать в составе линии несколько последовательно включенных PoE-репитеров, а также ограничиться рассмотрением при-

менения устройств, которые отвечают спецификации IEEE 802.3af (максимальная мощность нагрузки 12,95 Вт при максимальной мощности, отдаваемой источником в линию, 15,4 Вт).

Структурная схема линии, доставляющей дистанционное питание к терминальному устройству с потребляемой мощностью P_p , в составе которой функционируют один или несколько PoE-репитеров, показана на рисунке 4. Будем считать, что репитеры относятся к оборудованию Active PoE, т. к. функциональные возможности устройств класса Passive PoE в большинстве случаев не соответствуют решаемой задаче [16]. Коммутатор или инжектор PSE содержит источник с максимальной отдаваемой мощностью P_0 , остальные n сегментов формируются с помощью PoE-репитеров, имеющих мощность собственного потребления P_R .



Рис. 4. Структура линии с несколькими репитерами и схема нумерации репитеров и сегментов, принятая в данной статье
 Fig. 4. Line Structure with Multiple Repeaters and the Numbering Scheme for Repeaters and Segments Adopted in this Paper

Отдельные сегменты рассматриваемой структуры с точки зрения тока дистанционного питания полностью идентичны. Участки, соединяющие отдельные активные устройства структуры, представляют собой элементарные кабельные участки, построенные по схеме MPTL (аббр. от англ. Modular Pigtail Terminated Link – топология, при которой горизонтальные линии СКС подключаются к оборудованию напрямую без промежуточной розетки). Для определения электрического сопротивления R постоянному току отдельного кабельного участка будем исходить из его максимальной протяженности, что обусловливается необходимостью достижения наибольшей протяженности формируемой линии. С учетом нормируемой стандартами ISO/IEC 11801:2017 малости омической по постоянному току (максимальная величина этого параметра установлена равной 3 Ом) принимаем сопротивление участка $R = R_{sz} / 2$, где R_{sz} – сопротивление шлейфа на постоянном токе одной виты пары номинальной длины (100 м).

В зависимости от установок, используемых в микроконтроллере PD, при выполнении практических расчетов может применяться $R_{sz} = 40$ Ом или $R_{sz} = 25$ Ом. Возможная разница в погонном сопротивлении жестких инсталляционных и гибких шнуровых кабелей не учитывается, т. к. она мало влияет на конечный результат.

Расчет тока дистанционного питания отдельных сегментов

Поскольку напряжение восстанавливается в каждом PoE-репитере, можно полагать, что на входе каждого из сегментов рассматриваемой линии напряжение питания будет равно номинальному значению U_0 . Этот алгоритм работы репитеров приводит к тому, что задача по определению напряжений и токов на входах отдельных участков линии, становится нелинейной.

Начнем рассмотрение с последнего сегмента линии – номер 1 (см. рисунок 4), к которому подключено терминальное PoE-устройство (нагрузка с потребляемой мощностью P_y). На входе первого сегмента (выходе репитера 1) действует напряжение U_0 . Напряжение на терминальном устройстве U_1 будет меньше из-за потерь в проводах с сопро-

тивлением R . Входное сопротивление R_1 терминального устройства составляет:

$$R_1(U_1) = \frac{U_1^2}{P_y} \tag{1}$$

Считая, что напряжение питания терминального устройства равно U_0 , запишем выражение для тока I_1 :

$$I_1(U_1) = \frac{U_0}{R + R_1} = \frac{U_0}{R + U_1^2/P_y} \tag{2}$$

Рабочая точка (I_{1r}, U_{1r}) для входа терминального устройства в сегменте 1 находится на пересечении зависимости (2) с нагрузочной прямой:

$$I(U) = \frac{U_0 - U}{R} \tag{3}$$

Для аналитического определения (I_{1r}, U_{1r}) нужно решить уравнение:

$$\frac{U_0}{R + U_{1r}^2/P_y} = \frac{U_0 - U_{1r}}{R} \tag{4}$$

и рассчитать $I_{1r} = I(U_{1r})$ по выражению (3).

Для сегмента 2 можно записать аналогичные (1) и (2) выражения для входного сопротивления R_2 первого репитера и для тока I_2 в этом сегменте:

$$R_2(U_2) = \frac{U_2^2}{P_y + P_R + I_{1r}^2 R} \tag{5}$$

$$I_2(U_2) = \frac{U_0}{R + R_2} = \frac{U_0}{R + U_2^2/(P_y + P_R + I_{1r}^2 R)} \tag{6}$$

Напряжение U_2 относится ко входу первого репитера. В выражениях (5) и (6) учтена мощность P_R , потребляемая первым репитером. Далее будем считать, что все репитеры одинаковые.

Для нахождения входного напряжения первого репитера U_{2r} используем уравнение, аналогичное (4):

$$\frac{U_0}{R + U_{2r}^2/(P_y + P_R + I_{1r}^2 R)} = \frac{U_0 - U_{2r}}{R} \tag{7}$$

Ток $I_{2r} = I(U_{2r})$ можно рассчитать по выражению (3). В (5–7) входят ток I_{1r} и напряжение U_{1r} полученные при анализе сегмента 1.

Аналогично можно записать формулы для остальных сегментов линии. Общие выражения для сегмента с номером i имеют вид:

$$R_i(U_i) = \frac{U_i^2}{P_y + (i-1) \cdot P_R + (\sum_{k=1}^{i-1} I_{kr}^2)R}, \quad (8)$$

$$I_i(U_i) = \frac{U_0}{R + R_i} = \frac{U_0}{R + U_i^2 / (P_y + (i-1) \cdot P_R + (\sum_{k=1}^{i-1} I_{kr}^2)R)}, \quad (9)$$

Рабочее напряжение U_{ir} на входе репитера i является решением уравнения:

$$\frac{U_0}{R + U_{ir}^2 / (P_y + (i-1) \cdot P_R + (\sum_{k=1}^{i-1} I_{kr}^2)R)} = \frac{U_0 - U_{ir}}{R}. \quad (10)$$

Ток I_{ir} рассчитывается по (3): $I_{ir} = I(U_{ir})$.

Обратим внимание, что уравнение (10), а также приведенные выше уравнения (4) и (7) имеют по два аналитических решения. Физически правильным является только одно из них, которое для сегмента с номером i имеет вид:

$$U_{ir} = \frac{U_0}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{U_0^2 - 4R \left[\left(\sum_{k=1}^{i-1} I_{kr}^2 \right) R + P_y + (i-1)P_R \right]}, \quad (11)$$

$$I_{ir} = \frac{U_0 - U_{ir}}{R}.$$

Поскольку в (11) для сегмента i входят рабочие токи и напряжения, рассчитанные при анализе сегментов с номерами от 1 до $i-1$, это выражение является рекуррентным.

Для определения максимального количества сегментов n необходимо учесть дополнительное условие:

$$I_{ir} \leq I_{\max}, \quad I_{\max} = \frac{P_0}{U_0}, \quad (12)$$

где I_{\max} – максимально возможный ток, отдаваемый инжектором в начале линии (см. таблицу 1).

Мощность, рассеиваемую в сегментах с номерами от 1 до i , можно рассчитать по выражению:

$$P_i = P_y + (i-1) \cdot P_R + \left(\sum_{k=1}^i I_{kr}^2 \right) R. \quad (13)$$

Анализ полученных результатов

На рисунке 5 представлены результаты расчетов зависимостей $I(U)$ по выражению (9) для $i = 1..n$ и нагрузочная прямая (3) при следующих исходных данных: $U_0 = 48$ В, $P_0 = 15,4$ Вт, $P_y = 3$ Вт, $P_R = 2$ Вт, $R_{sz} = 40$ Ом.

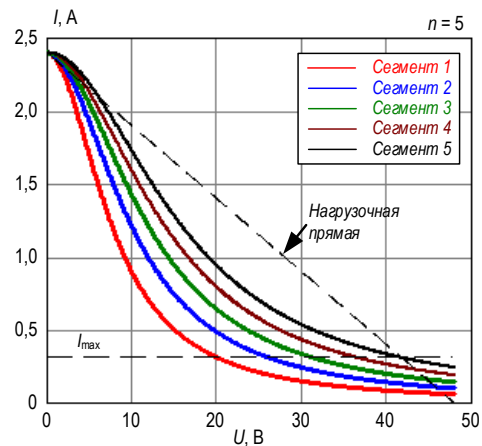


Рис. 5. Определение максимального числа сегментов и рабочих точек преобразователей в каждом из них

Fig. 5. Determining the Maximum Number of Segments and Operating Points of Converters in Each of Them

Видно, что нелинейные зависимости $I(U)$ имеют по 2 точки пересечения с нагрузочной прямой, соответствующие двум решениям уравнения (10). Также видно, что правильным является решение с меньшим током, не превышающим максимальный ток (в соответствии с (12) и таблицей 1), который может быть отдан инжектором.

Результаты расчетов по приведенным выше выражениям представлены в таблице 2. Расчеты показали, что линия передачи дистанционного питания PoE по стандарту 802.3af с $R_{sz} = 25$ Ом может содержать до 6 сегментов для терминального устройства мощностью 4 Вт и до 4 сегментов для терминального устройства мощностью 8 Вт. Если $R_{sz} = 40$ Ом, получаем 5 и 3 сегмента соответственно. Привлекая полученную ранее оценку гарантированной максимальной протяженности одного участка 150 м, получаем, что максимальная протяженность линии может достигать 450–900 м, а ее верхний предел определяется параметрами активного оборудования и, в частности, гарантированным выходным напряжением U_0 источника питания инжектора и выходного напряжения репитера.

Представляет интерес анализ бюджета мощности линии. Как видно из (13), он определяется тремя составляющими: потерями P_{sz} в витых парах линейного кабеля и собственным потреблением репитеров $P_{R\Sigma}$ и терминального устройства P_y . Первые две составляющие для линии, которая содержит n сегментов, находятся как:

$$P_{sz\Sigma} = \left(\sum_{k=1}^n I_{kr}^2 \right) R, \quad (14)$$

$$P_{R\Sigma} = (n-1)P_R.$$

Соотношения (14) позволяют определить относительный вес μ каждой составляющей в балансе мощностей линии:

$$\mu_{sz} = \frac{P_{sz\Sigma}}{P_n}, \quad \mu_R = \frac{P_{R\Sigma}}{P_n}, \quad (15) \quad \text{где } P_n \text{ рассчитывается по (13) при } i = n; \text{ результаты расчета этих составляющих для максимальной протяженности линии представлены в таблице 3.}$$

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчетов параметров сегментов линии передачи дистанционного питания

TABLE 2. Calculation Results for Parameters of Remote Power Supply Line Segments

Стандарт IEEE	P ₀ , Вт	U ₀ , В	P _y , Вт	Число сегментов / репитеров	Номер сегмента														
					1		2		3		4		5		6		7		
					I _{1r} , А	P ₁ , Вт	I _{2r} , А	P ₂ , Вт	I _{3r} , А	P ₃ , Вт	I _{4r} , А	P ₄ , Вт	I _{5r} , А	P ₅ , Вт	I _{6r} , А	P ₆ , Вт	I _{7r} , А	P ₇ , Вт	
R _{sz} = 25 Ом, P _R = 1,2 Вт																			
802,3af	15,4	44	4	6 / 5	0,093	4,11	0,125	5,50	0,160	7,02	0,198	8,71	0,242	10,6	0,294	12,9	-	-	
			8	4 / 3	0,192	8,46	0,235	10,4	0,286	12,6	0,347	15,3	-	-	-	-	-	-	
		48	4	7 / 6	0,085	4,09	0,114	5,45	0,144	6,91	0,177	8,50	0,214	10,3	0,256	12,3	0,305	14,7	-
			8	4 / 3	0,175	8,38	0,211	10,1	0,253	12,1	0,302	14,5	-	-	-	-	-	-	-
		57	4	7 / 6	0,071	4,06	0,094	5,37	0,118	6,75	0,144	8,21	0,172	9,78	0,201	11,5	0,235	13,4	-
			8	4 / 3	0,145	8,26	0,173	9,83	0,203	11,5	0,236	13,4	-	-	-	-	-	-	-
802,3at	30	50	12	5 / 4	0,256	12,8	0,303	15,2	0,360	18,0	0,430	21,5	0,522	26,1	-	-	-	-	
			20	2 / 1	0,451	22,5	0,551	27,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		52	12	5 / 4	0,245	12,7	0,288	15,0	0,339	17,6	0,401	20,8	0,479	24,9	-	-	-	-	
			20	2 / 1	0,429	22,3	0,516	26,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		57	12	6 / 5	0,221	12,6	0,257	14,6	0,297	16,9	0,344	19,6	0,400	22,8	0,470	26,8	-	-	-
			20	2 / 1	0,383	21,8	0,448	25,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R _{sz} = 40 Ом, P _R = 1,2 Вт																			
802,3af	15,4	44	4	5 / 4	0,095	4,18	0,130	5,72	0,170	7,50	0,220	9,66	0,283	12,5	-	-	-	-	
			8	3 / 2	0,200	8,80	0,257	11,3	0,336	14,8	-	-	-	-	-	-	-	-	
		48	4	6 / 5	0,086	4,15	0,117	5,62	0,152	7,28	0,192	9,22	0,241	11,6	0,305	14,6	-	-	
			8	3 / 2	0,180	8,65	0,227	10,9	0,286	13,7	-	-	-	-	-	-	-	-	
		57	4	7 / 6	0,072	4,10	0,096	5,49	0,123	6,99	0,152	8,65	0,185	10,5	0,223	12,7	0,270	15,4	-
			8	4 / 3	0,148	8,44	0,181	10,3	0,218	12,4	0,264	15,0	-	-	-	-	-	-	-
802,3at	30	50	12	3 / 2	0,269	13,4	0,339	16,9	0,440	22,0	-	-	-	-	-	-	-		
		52	12	3 / 2	0,256	13,3	0,318	16,5	0,404	21,0	-	-	-	-	-	-	-		
		57	12	4 / 3	0,229	13,0	0,277	15,8	0,338	19,3	0,421	24,0	-	-	-	-	-		

ТАБЛИЦА 3. Анализ баланса мощностей в линии передачи дистанционного питания

TABLE 3. Analysis of Power Balance in the Remote Power Supply Line

Стандарт IEEE	P ₀ , Вт	U ₀ , В	P _y , Вт	Число сегментов / репитеров	P _n , Вт	P _{szΣ} , Вт	P _{RΣ} , Вт	μ _{sz} , %	μ _R , %
R _{sz} = 25 Ом, P _R = 1,2 Вт									
802,3af	15,4	44	4	6 / 5	12,9	2,9	6,0	22,6	46,3
			8	4 / 3	15,3	3,7	3,6	24,1	23,6
		48	4	7 / 6	14,7	3,5	7,2	23,6	49,1
			8	4 / 3	14,5	2,9	3,6	19,9	24,9
		57	4	7 / 6	13,4	2,2	7,2	16,2	53,8
			8	4 / 3	13,4	1,8	3,6	13,7	26,8
802,3at	30	50	12	5 / 4	26,1	9,3	4,8	35,7	18,4
			20	2 / 1	27,5	6,3	1,2	23,0	4,40
		52	12	5 / 4	24,9	8,1	4,8	32,5	19,3
			20	2 / 1	26,8	5,6	1,2	21,0	4,50
		57	12	6 / 5	26,8	8,8	6,0	32,8	22,4
			20	2 / 1	25,5	4,3	1,2	17,0	4,70

Стандарт IEEE	P_0 , Вт	U_0 , В	P_y , Вт	Число сегментов / репитеров	P_n , Вт	P_{sz} , Вт	P_{Rz} , Вт	μ_{sz} , %	μ_R , %
$R_{sz} = 40$ Ом, $P_R = 1,2$ Вт									
802,3af	15,4	44	4	5 / 4	12,5	3,7	4,8	29,4	38,5
			8	3 / 2	14,8	4,4	2,4	29,6	16,2
		48	4	6 / 5	14,6	4,6	6,0	31,7	40,9
			8	3 / 2	13,7	3,3	2,4	24,1	17,5
		57	4	7 / 6	15,4	4,2	7,2	27,2	46,8
			8	4 / 3	15,0	3,4	3,6	22,8	23,9
802,3at	30	50	12	3 / 2	22,0	7,6	2,4	34,6	10,9
		52	12	3 / 2	21,0	6,6	2,4	31,4	11,4
		57	12	4 / 3	24,0	8,4	3,6	35,0	15,0

Из таблицы 3 видно, что при дистанционном питании маломощных устройств (класс 1 по мощности) собственное потребление репитеров составляет около 50 %, то есть является критически важным фактором для поддержания баланса мощностей линии. При увеличении мощности P_y относительный вес этой составляющей снижается.

Заключение

Проведенные исследования позволяют утверждать, что линии с PoE-репитерами для подключения терминальных устройств значимо востребованы в массовой практике реализации проектов, а их предельная протяженность ограничена потерями в витых парах линейного кабеля и собственным потреблением репитеров.

Разработанная методика определения максимальной протяженности линии с PoE-репитерами позволила установить, что наиболее значимым фактором, определяющим предельную протяженность линии для питания маломощных терминальных устройств, является собственная мощность потребления PoE-репитера. При увеличении мощности терминальных устройств возрастает роль потерь в витых парах линейного кабеля.

Расчеты показали, что при использовании серийной техники и мощности потребления терминального устройства 4 Вт предельная протяженность линии с PoE-репитерами может достигать 900 м.

Список источников

1. Семёнов А.Б., Сунчелей И.Р., Стрижаков С.К. Структурированные кабельные системы. М.: ДМК Пресс; Компания АйТи, 2023. 642 с.
2. Самарский П.А. Основы структурированных кабельных систем. М.: ДМК Пресс; Компания АйТи, 2023. 216 с.
3. BICSI. Telecommunications distribution methods manual // BICSI. 2025. URL: <https://www.bicsi.org/education-certification/education-@-bicsi-learning-academy/technical-publications/telecommunications-distribution-methods-manual>
4. Шерстнев С. PoE для устройств повышенной мощности // Компоненты и технологии. 2012. № 5(130). С. 56–58. EDN:OXTXDN
5. Терентьев А.М. Актуальные проблемы бесперебойного электропитания персональных компьютеров и серверов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. № 30(219). С. 46–53. EDN:QVVTAJ
6. Кондратьев В. Преимущества стандарта однопарного Ethernet // Электронные компоненты. 2024. № 5. С. 24–27. EDN:ICPNOL
7. Zainal Al.N. The Architecture of Smart Home Internet of Things // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 8. С. 58–61. EDN:ZKBXFY
8. Семенов А.Б. Технология PoDL – система дистанционного питания для интернета вещей // Первая миля. 2022. № 8(108). С. 58–63. DOI:10.22184/2070-8963.2022.108.8.58.62. EDN:KAKVEI
9. Рылов С.А. Однопарный Ethernet T1S как основа интеллектуальных датчиков промышленного интернета вещей // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 4(35). С. 222–232. DOI:10.24412/2413-7383-2024-4-222-232. EDN:EEWIMM
10. Bjelkefelt M., Badon E., Harihanan S. Understanding Fault Managed Power. White Paper // EnerSys. 2023. 17 p. URL: <https://www.enersys.com/49986f/globalassets/documents/marketing-literature/esg/communications/white-papers/amer/amer-en-wp-understandingfaultmanagedpowersystems-0923.pdf> (дата обращения 10.08.2025)
11. Семенов А.Б. Гибридные кабели для нижних уровней информационных систем // Первая миля. 2018. № 2(71). С. 18–22. DOI:10.22184/2070-8963.2018.71.2.18.22. EDN:YWHYEU
12. Семенов А.Б. Как технология PoE меняет подходы к построению и эксплуатации СКС // Вестник связи. 2021. № 8. С. 24–28. EDN:ZMROXI
13. Терентьев Д., Пашкевич А., Сергеев А. Оборудование Commeng для сетей Ethernet: передача питания и данных по одному кабелю, не соответствующая стандартам PoE // Первая миля. 2010. № 2. С. 50–57. EDN:PBFRAB

14. Смирнов И.Г. Структурированные кабельные системы: проектирование, монтаж и эксплуатация. М: Экон-Информ, 2005. 348 с.
15. Гальперович Д.Я., Яшневу Ю.В. Инфраструктура кабельных сетей. М.: Русская панорама, 2006. 248 с.
16. Терентьев Д. Заметки об (инжекторах) Power over Ethernet. Часть 2 // Первая миля. 2021. № 1(93). С. 54–59. DOI:10.22184/2070-8963.2021.93.1.54.59 EDN:VVBEHG

References


1. Semenov A.B., Suncheley I.R., Strizhakov S.K. *Structured Cabling Systems*. Moscow: DMK Press Publ.; Kompaniya AjTi Publ.; 2023. 642 p. (in Russ.)
2. Samarsky P.A. *Fundamentals of Structured Cabling Systems*. Moscow: DMK Press Publ.; Kompaniya AjTi Publ.; 216 p. (in Russ.)
3. BICSI. Telecommunications distribution methods manual. *BICSI*. 2025. URL: <https://www.bicsi.org/education-certification/education-@-bicsi-learning-academy/technical-publications/telecommunications-distribution-methods-manual>
4. Sherstnev S. PoE for high-power devices. *Components & Technologies*. 2012;5:56–58. (in Russ.) EDN:OXTXDH
5. Terentyev A.M. Actual problems of uninterrupted power supply of personal computers and servers. *National Interests: Priorities and Security*. 2013;30(219):46–53. (in Russ.) EDN:QYVTAJ
6. Kondratiev V. Advantages of the single-pair Ethernet standard. *Electronic components*. 2024;5:24–27. (in Russ.) EDN:ICPNOL
7. Zainal Al.N. The Architecture of Smart Home Internet of Things. *T-Comm*. 2021;15(8):58–61. EDN:ZKBXFY
8. Semenov A. PoDL Technology – Remote Power System for Internet of Things. *Last Mile*. 2022;8(108):58–63. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2022.108.8.58.62. EDN:KAKVEI
9. RYLOV S.A. Single-Pair Ethernet T1S as the Basis for Intelligent Sensors of the Industrial Internet of Things. *Problems of Artificial Intelligence*. 2024;4(35):222–232. (in Russ.) DOI:10.24412/2413-7383-2024-4-222-232. EDN:EEWIMM
10. Bjelkefelt M., Badon E., Harihanan S. Understanding Fault Managed Power. White Paper. *EnerSys*. 2023. 17 p. URL: <https://www.enersys.com/49986f/globalassets/documents/marketing-literature/esg/communications/white-papers/amer/amer-en-wp-understandingfaultmanagedpowersystems-0923.pdf> [Accessed 10.08.2025]
11. Semenov A. Hybrid Cables for Lower Levels of Information Systems. *Last Mile*. 2018;2(71):18–22. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2018.71.2.18.22. EDN:YWHYFY
12. Semenov A.B. How the PoE Technology Changes the Approaches to the Construction and Operation of SCS. *Vestnik Svyaz*. 2021;8:24–28. (in Russ.) EDN:ZMROXI
13. Terentyev D., Pashkevich A., Sergeev A. Commeng Equipment for Ethernet Networks: Transmission of Power and Data Over a Single Cable That Does Not Comply with PoE Standards. *Last Mile*. 2010;2:50–57. (in Russ.) EDN:PBFRAB
14. Smirnov I.G. *Structured Cabling Systems: Design, Installation and Operation*. Moscow: Ekon-Inform Publ.; 2005. 348 p. (in Russ.)
15. Galperovich D.Ya., Yashnev Yu.V. *Infrastructure of Cable Networks*. Moscow: Russkaya panorama Publ.; 2006. 248 p. (in Russ.)
16. Terentyev D. Notes About (Injectors) Power Over Ethernet. Part 2. *Last Mile*. 2021;1(93):54–59. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2021.93.1.54.59 EDN:VVBEHG

Статья поступила в редакцию 19.10.2025; одобрена после рецензирования 02.12.2025; принята к публикации 19.12.2025


The article was submitted 19.10.2025; approved after reviewing 02.12.2025; accepted for publication 19.12.2025

Информация об авторах:


БЫЛИНА
Мария Сергеевна

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-9818-4060>

ГЛАГОЛЕВ
Сергей Федорович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оптических и квантовых систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-0664-9877>

СЕМЕНОВ
Андрей Борисович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механизации, автоматизации и роботизации в строительстве Московского государственного научно-исследовательского университета
 <https://orcid.org/0000-0002-8220-6904>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.