

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (05.14.02)

УДК 621.31.001.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-83-88

Применение класса напряжения 20 кВ в системах электроснабжения современных мегаполисов

М.Ю. Львов, Д.Ю. Камнев

Мегаполисы характеризуются высоким уровнем энергопотребления, значительной плотностью электрических нагрузок и повышенными требованиями к надежности электроснабжения потребителей. Традиционно в СССР и далее в России для городских распределительных электрических сетей применяются классы напряжения 6 и 10 кВ.

Возрастающая плотность электрической нагрузки и потребления электроэнергии не позволяет в крайне стесненных условиях развивающихся городов осуществлять электроснабжение по существующим кабельным линиям напряжением 6...10 кВ из-за их ограниченной пропускной способности и недостаточной надежности.

Техническое состояние оборудования и кабельных линий в питающих сетях 6-10 кВ имеет значительный физический и моральный износ. Существующие сети имеют недостаточное резервирование и практически исчерпали свои возможности по подключению новых потребителей.

Эти обстоятельства потребовали принять решение о переходе на класс напряжения 20 кВ, что является стратегическим направлением развития электрических сетей среднего напряжения в Москве. Согласно этому решению с 2000-х годов в России и в г. Москве активно развиваются электрические сети напряжением 20 кВ.

В данной статье выполнен анализ реализуемых подходов к применению электрической сети 20 кВ в мегаполисах разных стран.

Ключевые слова: электрическая сеть 20 кВ, трансформаторная подстанция, технико-экономические характеристики, области применения.

Для цитирования: Львов М.Ю., Камнев Д.Ю. Применение класса напряжения 20 кВ в системах электроснабжения современных мегаполисов // Вестник МЭИ. 2020. № 5. С. 83—88. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-83-88.

Application of the 20 kV Voltage Class in the Electric Power Supply Systems of Modern Megalopolises

M.Yu. Lvov, D.Yu. Kamnev

Megacities are characterized by a high level of energy consumption, a significant density of electrical loads and increased requirements for the reliability of power supply to consumers. Traditionally in the USSR and further in Russia, voltage classes of 6 and 10 kV are used for urban distribution electric networks.

The increasing density of electric load and electricity consumption does not allow in extremely cramped conditions of developing cities to provide electricity through existing cable lines with a voltage of 6-10 kV due to their limited bandwidth and lack of reliability.

The technical condition of the equipment and cable lines in the 6-10 kV supply networks has significant physical and moral deterioration. Existing networks have insufficient redundancy and have practically exhausted their ability to connect new consumers.

These circumstances required a decision to switch to a voltage class of 20 kV, which is a strategic direction for the development of medium voltage electrical networks in Moscow. According to this decision, since the 2000s, electric networks with a voltage of 20 kV have been actively developing in Russia and in Moscow.

This article analyzes the implemented approaches to the use of an electric network of 20 kV in megacities of different countries.

Key words: electric network 20 kV, transformer substation, technical and economic characteristics, fields of application.

For citation: Lvov M.Yu., Kamnev D.Yu. Application of the 20 kV Voltage Class in the Electric Power Supply Systems of Modern Megalopolises. Bulletin of MPEI. 2020;5:83—88. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-83-88.

Введение

Номинальные напряжения городских электрических сетей в СССР и далее в России устанавливались соответствующими стандартами. Исторически в сетях среднего напряжения для городских электрических сетей получили распространение напряжения 6 и 10 кВ. При этом внедрение напряжения 10 кВ в ряде городов было осуществлено еще в 30-х годах прошлого века.

Первоначально в большинстве городов широкое распространение получило развитие электрических сетей напряжением 6 кВ, что было связано с использованием данного класса напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий, от подстанций которых питались потребители городской сети [1]. Использование напряжения 6 кВ на промышленных предприятиях определялось отсутствием электродвигателей 10 кВ, при этом построение сети напряжением 6 кВ позволяло обеспечить приемлемую схему электроснабжения с учетом существующих нагрузок.

В конце 50-х годов прошлого века в СССР в Правила устройства электроустановок были внесены требования о необходимости построения городских электрических сетей среднего напряжения на номинальное напряжение 10 кВ. В дальнейшем, Всесоюзным институтом электроэнергетики (ВНИИЭ) были разработаны рекомендации по переводу электрических сетей напряжением 6 кВ на номинальное напряжение 10 кВ.

Вместе с тем, стоит отметить, что к 2000 году в городских электрических сетях России примерно 50% электрических сетей составляло номинальное напряжение 6 кВ, а остальную часть составляли электрические сети напряжением 10 кВ.

Номинальное напряжение 20 кВ в нашей стране было введено в соответствующий стандарт еще в конце 60-х годов. В ГОСТ 721—77 «Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии» введенный в 1978 г., для среднего напряжения были установлены следующие классы напряжения: 6, 10, 20, 35 кВ. При этом в данном ГОСТ указывалось, что номинальное напряжение 6 кВ для вновь проектируемых сетей не рекомендуется. Однако в качестве основного напряжения для городских электрических сетей среднего напряжения в СССР было принято напряжение 10 кВ, при этом аналогичная рекомендация была принята МЭК для других стран, внедрение электрических сетей номинальным напряжением 20 кВ осуществлялось медленно.

В Указаниях по проектированию городских электрических сетей ВСН 97—75, утвержденных Минэнерго СССР в 1975 г. указывалось, что для большинства городов наиболее целесообразной на ближайший период является система напряжений 110/10/0,4 кВ, а для крупных и крупнейших городов (мегаполисов) на перспективу следует рассматривать переход на систему 220/10-20/0,4 кВ. Также указывалось, что использование напряжения 20 кВ в городских электрических сетях может быть экономически оправдано при нали-

чии соответствующего оборудования и кабелей, стоимость которых не превышает более чем на 20...30% стоимость оборудования и кабелей на напряжение 10 кВ. Применение напряжения 20 кВ в городских распределительных сетях в первую очередь рассматривается при следующих условиях:

- наличие генераторного напряжения 20 кВ;
- питание новых крупных районов застройки от подстанций глубокого ввода 110...220 кВ;
- совместное питание от центров питания кабельных и воздушных сетей (районы малоэтажной застройки).

В Инструкции по проектированию городских и поселковых электрических сетей ВСН 97—83, утвержденной Минэнерго СССР в 1983 г. указывалось, что выбор класса напряжения системы электроснабжения города и поселка должен производиться с учетом сокращения количества трансформаций энергии и ликвидации напряжений 6 и 35 кВ с переводом действующих сетей 6 и 35 кВ на повышенное напряжение 10 и 110 кВ. При этом указывалось, что для большинства городов и поселков на ближайший период наиболее целесообразной является система напряжений 220...110/10 кВ; для крупнейших городов 500/220...110/10 кВ или 330/110/10 кВ. Применение напряжения 20 кВ в городских распределительных сетях допустимо при следующих условиях:

- наличии генераторного напряжения 20 кВ;
- реконструкции и расширении действующих сетей напряжением 20 кВ.

Целесообразность применения сетей напряжением 20 кВ во всех случаях требует технико-экономического обоснования.

При этом также указывалось, что городские электрические сети напряжением 10...35 кВ должны выполняться трехфазными с изолированной или заземленной через дугогасящие реакторы нейтралью.

В 1994 г. Министерством топлива и энергетики Российской Федерации и РАО «ЕЭС России» была утверждена Инструкция по проектированию городских электрических сетей [2]. В соответствии с требованиями указанного документа городские электрические сети должны выполняться комплексно, с увязкой между собой электроснабжающих сетей 35 кВ и выше и распределительных сетей 6...20 кВ, с учетом всех потребителей города и прилегающих к нему районов. Электрические сети должны выполняться с учетом обеспечения наибольшей экономичности, требуемой надежности электроснабжения, соблюдения установленных норм качества электроэнергии.

Напряжение системы электроснабжения города должно выбираться с учетом наименьшего количества ступеней трансформации энергии. При этом указывается, что для большинства городов на ближайший период развития города наиболее целесообразной является система напряжений 35...110/10 кВ; для крупнейших и крупных городов — 500/220...110/10 кВ или 330/110/10 кВ, при этом в крупнейших и крупных городах использование напряжения 35 кВ должно быть ограничено.

В данном документе также отмечается, что в новых районах застройки напряжение распределительных сетей выше 1 кВ должно приниматься не ниже 10 кВ независимо от напряжения сети в существующей части города. Применение напряжения 15...20 кВ в городских распределительных сетях рекомендуется рассматривать при реконструкции или расширении действующих сетей этого класса напряжения. Целесообразность применения сетей этих классов напряжения должна быть технико-экономически обоснована.

В методических указаниях ОАО «МОЭСК» показано, что развитие сетей Московского региона должно осуществляться в направлении перевода распределительных сетей на класс напряжения 20 кВ [3]. Разработанная схема развития распределительных сетей с учетом ожидаемых электрических нагрузок в качестве одного из мероприятий обеспечения надежного электроснабжения включает перевод сетей среднего напряжения на класс 20 кВ [4].

Анализ развития нормативно-технической документации в нашей стране в части выбора номинального напряжения для городских электрических сетей в период до 2000 г. показывает, что, начиная с конца 1960-х годов в основных директивных документах рассматривалась при определенных условиях возможность применения напряжения 20 кВ для построения городских электрических сетей, вместе с тем, строительство сетей 20 кВ не происходило. С конца 1960-х годов городские электрические сети строились на номинальное напряжение 10 кВ в трехфазном исполнении с изолированной или заземленной через дугогасящие реакторы нейтралью.

Развитие электрических сетей 20 кВ в мире

В странах западной Европы в целом существовало два основных подхода к системам напряжений: английский 0,4/11/33/66/132/275/400 кВ и немецкий 0,4/10/35/110/220/400 кВ. При этом в 1950 — 1960 гг. прошлого столетия во многих крупных городах была произведена стандартизация номинальных напряжений для городских электрических сетей.

Вместе с тем, в разное время получило определенное развитие применение номинального напряжения 20 кВ в том числе с использованием подстанций глубокого ввода 380/230/20, 400/225/20, 525/220/20, а также 225/20, 220/20 и 110/20 кВ.

В крупных городах Германии используется структура напряжений 230/20/0,4 и 110/10/0,4 кВ. В большинстве городов используется структура 230/20/0,4 кВ. По состоянию на 2012 год протяженность кабельных сетей регионов Восточная Бавария, Верхняя Бавария, Верхняя и Нижняя Саксония 20 кВ составила 30511 км.

Во Франции, в Париже распределение энергии среди районов города осуществляется с использованием структуры 225/20/0,4 кВ за счет подстанций глубокого ввода и развитой сети среднего напряжения с созданием кольцевой сети 20 кВ [5, 6].

В крупных городах Италии, таких как Рим и Милан, первая сеть 20 кВ появилась в конце 1970-х годов. Класс напряжения 20 кВ развивается благодаря двум крупным участникам рынка Итальянских электрических сетей: CESI и ACEA Distribuzione. Электроснабжение сетей среднего напряжения происходит через трансформацию 150/20 кВ. Для унификации сечений на 20 кВ применяются два стандартных сечения — трехфазный кабель с пластмассовой изоляцией, с сегментированными жилами из алюминия, сечениями 185 мм² и 150 мм². Пиковая нагрузка в энергосистеме Рима в 2005 году достигала 5 ГВт, расчеты проведенные на перспективу развития энергосистемы учитывают увеличение нагрузки до 10,2 ГВт [7].

В Нидерландах используется система электроснабжения городов на классы напряжения 10 кВ, с компенсированной нейтралью и 20 кВ с низкоомным заземлением резистора. Общая протяженность кабельных сетей среднего напряжения составляет около 44000 км. Техническая политика направлена на увеличение протяженности сети 20 кВ. В городских и сельских системах электроснабжения Финляндии используется кабельная сеть 20 кВ с компенсированной нейтралью. Общая протяженность кабельных сетей среднего напряжения по стране составляет 53200 км. В 2012 году правительством Финляндии принята программа по повышению надежности электроснабжения потребителей, в результате данной программы предлагается значительный перевод воздушных линий с изолированными проводами на кабельные сети [8].

В целях ограничения времени воздействия на сети 6...35 кВ повышенных уровней напряжения при возникновении однофазных замыканий на землю в европейских странах эти сети работают с заземлением нейтрали через активное сопротивление [9].

В США система электроснабжения городов использует широкий спектр напряжений. В сетях крупнейших городов страны широко используют сети среднего напряжения от 5 до 15 кВ. Сети 15 кВ наиболее распространены и в целом по стране составляют 80% общей протяженности. Для высотных зданий сети среднего напряжения прокладываются внутри зданий.

В 2003 году на I Национальной конференции по развитию распределительных сетей Китая было достигнуто соглашение о добавлении класса напряжения сети 20 кВ в национальный стандарт электрических сетей GB-156—2003. Напряжение 20 кВ было включено в обновленный стандарт GB-156—2006, в качестве основного класса напряжения для распределения среднего напряжения в городах [10].

В 2008 — 2010 годы были построены подстанции 110/20 кВ, которые осуществляли электроснабжение центрального парка в новом районе «Сучжоу Парк» только сетями 20 кВ. При строительстве нового района Тяньцзинь (Биньхай), зона развития Харбин (Кунли) были использованы кабельные сети 20 кВ. Плотность

нагрузки городских сетей напряжением 20 кВ составила 12,72 МВт/км².

По завершению 10 и 11 пятилетки планируется строительство высокотехнологичных предприятий в Индустриальном Парке Сучжоу суммарной трансформаторной мощностью распределительных пунктов порядка 154000 кВА. Плотность нагрузки в основной зоне промышленного парка Сучжоу, по прогнозам, будет высокой, и в ближайшей перспективе достигнет 30 МВт/км², а планируемая нагрузка в долгосрочной перспективе составит 50 МВт/км². В 2006 г. Существующие сети 10 кВ исчерпали свои технические возможности по пропускной способности.

Развитие электрических сетей 20 кВ в России

Электрические сети напряжением 20 кВ в России начали развиваться в г. Москве с 2001 года со строительством ПС 110 кВ «Сити-1», предусмотренной для электроснабжения Московского международного делового центра «Москва-Сити». Потребляемая мощность зданий в нем оценивалась на уровне 15...30 и более МВт. В дальнейшем сети на напряжении 20 кВ получили развитие в схеме электроснабжения комплексной высотной застройки Ходынского поля [11].

Следует отметить, что концентрация мощностей на ограниченных площадях характерна не только для уникальных объектов ММДЦ «Москва-Сити», но и для вновь вводимых многофункциональных, жилых и торгово-развлекательных комплексов; 10...20 МВт — типичная мощность, запрашиваемая застройщиками.

Созданная к настоящему времени электрическая сеть 20 кВ уже сейчас охватывает всю территорию г. Москвы и создает возможность дальнейшего развития деловой, транспортной, жилищной и коммунальной инфраструктуры города.

В соответствии с постановлением Правительства г. Москвы «Об энергетической стратегии города Москвы на период до 2025 года» и на основании Схемы электроснабжения г. Москвы на период до 2020 года переход на класс напряжения 20 кВ принят как стратегическое направление развития электрических сетей среднего напряжения города.

В целях повышения надежности электроснабжения потребителей постановлением определено:

- осуществлять развитие сетей напряжением 20 кВ и 10 кВ с сооружением распределительных (РП) или соединительных пунктов (СП) с присоединением их к двум разным центрам питания (ЦП);

- применять при развитии электрических сетей современное малогабаритное оборудование с вакуумной или элегазовой изоляцией и кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Внедрение в электрических сетях напряжения 20 кВ, в отличие от напряжений 6 и 10 кВ, позволяет:

- существенно увеличить пропускную способность сети (как минимум в 2...2,5 раза в пределах той

же площади территории);

- уменьшить потери электрической энергии в линиях питающей и распределительной сети;

- улучшить качество напряжения у потребителей;

- снизить количество новых ячеек, вводимых в центрах питания;

- увеличить экономический радиус обслуживания электроустановок;

- уменьшить количество вновь вводимых ТП и КЛ.

Согласно с основными принципами, заложенными в Схеме электроснабжения г. Москвы на период до 2020 г., развитие электрических сетей 20 кВ должно осуществляться с применением следующих принципов:

- схема питающей сети 20 кВ строится как с применением РП аналогично схеме 10 кВ, так и по принципу магистрали с отбором мощности от двух ЦП;

- питание РП выполняется от двух независимых территориально разнесённых ЦП по двум независимым (взаиморезервируемым) кабельным линиям;

- базовое сечение новых КЛ (с изоляцией из сшитого полиэтилена) принимается 500 мм², либо 240 мм²;

- сеть 20 кВ выполняется по принципу резистивного заземления нейтрали с действием устройств релейной защиты на отключение повреждённых линий (при однофазном замыкании на землю).

В настоящее время существующие электроснабжающие (питающие) сети напряжением 20 кВ выполнены из двухсекционных РП с АВР на секционном выключателе 20 кВ и питанием РП от двух независимых, территориально разнесенных ЦП, по двум независимым (взаиморезервируемым) кабельным линиям.

Разновидностью является применение вместо РП соединительных пунктов по схеме двухцепной магистрали между двумя центрами питания с отбором мощности посредством заходов в СП 20 кВ (в отдельных случаях СП подключены к магистрали между РП).

На первом этапе построение опорной сети 20 кВ производилось с применением вместо РП соединительных пунктов на выключателях нагрузки полной заводской готовности, блочного изготовления в бетонной оболочке. Мощность СП составляет не менее 10...20 МВА, АВР в СП не предусматривался. От каждой из двух подстанций 110/20 кВ прокладываются по 4 магистральные линии одножильными кабелями. Через СП магистрали напряжением 20 кВ образуют кольцо по периферии застройки, между СП включаются цепочки ТП распределительной сети, выполненной одножильными кабелями. В каждой цепочке до 8-ми ТП с двумя трансформаторами по 1000 кВА каждый

Перевод в г. Москве распределительных сетей на более высокий класс напряжения означает переход от распределительной сети 110/6...10 кВ к сети 220/20 кВ при проектировании и строительстве новых электросетевых объектов для питания новых потребителей. Поэтому, при строительстве электросетевых объектов

в районах новостроек целесообразно новые центры питания (ЦП) выполнять на напряжении 220 кВ, а распределительную сеть - на напряжении 20 кВ.

В районах старой застройки и примыкающей к ним новой, целесообразно строительство новых ЦП или реконструкция старых с установкой трехобмоточных трансформаторов напряжением 220/20/10 кВ (110/20/10 кВ) с постепенным переводом существующих сетей напряжением 6-10 кВ на 20 кВ. Причем большинство существующих кабельных линий 10 кВ пока сохраняется. В этой связи, все вновь прокладываемые линии и оборудование новых ТП напряжением 10 кВ должны предусматриваться с изоляцией на 20 кВ для обеспечения возможности их перехода на это напряжение. Для повышения пропускной способности сетей напряжением 10...20 кВ, снижения потерь мощности и электроэнергии, поддержания допустимого значения $\tan\delta$ при проектировании рассматривается целесообразность установки компенсирующих устройств реактивной мощности, главным образом, непосредственно у потребителей.

Заключение

При проектировании электрических сетей напряжением 20 кВ в Мегалополисе должны предъявляться следующие требования [12, 13]:

- обеспечение необходимой надежности электропитания потребителей;
- максимальная унификация применяемых схем и оборудования;
- блочная конструкция распределительных и соединительных пунктов, трансформаторных подстанций;
- применение оборудования с элегазовой изоляцией;
- использование кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена, в том числе в трехфазном исполнении.

Литература

1. **Справочник** по проектированию электроэнергетических систем / под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. **РД 34.20.185—94.** Инструкция по проектированию городских электрических сетей.
3. **Методические** указания по применению в ОАО «Московская объединенная электросетевая компания» основных технических решений по эксплуатации, реконструкции и новому сетевому строительству электросетевых объектов [Электрон. ресурс] www.rossetimr.ru/zakupki/podryadchik/doc/2014/Metod_1.pdf (дата обращения 20.11.2019).
4. **Схема** электроснабжения города Москвы (распределительные сети напряжением 6-10-20 кВ на период до 2030 года с учетом присоединенных территорий [Электрон. ресурс] www.mos.ru/dgkh/anticorruption/antikorrupcionnaia-ekspertiza/view/42729220/ (дата обращения 20.11.2019).
5. **Höne S., Montebaur A., Hehrkorn H.J.** Earth Fault Trails and Measurements in Rural 20 kV Networks

— резистивное заземление нейтрали при оснащении новой сети 20 кВ быстродействующими защитами с абсолютной селективностью на каждом участке;

— оснащение распределительных и соединительных пунктов оборудованием телеуправления, телеизмерения, телесигнализации и АИИС КУЭ.

Развитие электрической сети напряжением 20 кВ с резистивным заземлением нейтрали требует согласованного построения новых, надежных и эффективных систем защит и автоматики.

В настоящее время в части защиты и автоматики электрической сети 20 кВ с резистивным заземлением нейтрали используются наиболее простые системы, представляющие последовательность ступенчатых токовых защит по аналогии с ранее построенными сетями 6...10 кВ с изолированной нейтралью.

Одним из способов повышения быстродействия надежности защиты элементов распределительной сети мегаполиса является использование защит с абсолютной селективностью [14]. При этом на электрических присоединениях организовываются дифференциальные защиты, играющие роль основных, а функции резервных перейдут к ступенчатым защитами.

Применение дифференциальных защит в электрической сети мегаполиса позволяет увеличить быстродействие определения и отключения повреждения в сети и расширить максимально допустимое количество независимых селективных зон действия системы защиты и автоматики.

В заключение необходимо констатировать, что внедрение и дальнейшее развитие электрических сетей 20 кВ в Мегалополисах России является технически и экономически оправданным направлением и в ближайшей перспективе будет расширяться.

References

1. **Spravochnik** po Proektirovaniyu Elektroenergeticheskikh Sistem. Pod Red. S.S. Rokotyana, I.M. Shapiro. M.: Energoatomizdat, 1985. (in Russian).
2. **RD 34.20.185—94.** Instruksiya po Proektirovaniyu Gorodskikh Elektricheskikh Setey. (in Russian).
3. **Metodicheskie** Ukazaniya po Primeneniyu v ОАО «Moskovskaya Ob'edinennaya Elektrosetevaya Kompaniya» Osnovnykh Tekhnicheskikh Resheniy po Ekspluatatsii, Rekonstruktsii i Novomu Setevomu Stroitel'stvu Elektrosetevykh Ob'ektov [Elektron. Resurs] www.rossetimr.ru/zakupki/podryadchik/doc/2014/Metod_1.pdf (Data Obrashcheniya 20.11.2019). (in Russian).
4. **Skhema** Elektrosnabzheniya Goroda Moskvy (Raspredelitel'nye Seti Napryazheniem 6-10-20 kV na Period do 2030 Goda s Uchetom Prisoedinennykh Territoriy [Elektron. Resurs] www.mos.ru/dgkh/anticorruption/antikorrupcionnaia-ekspertiza/view/42729220/ (Data Obrashcheniya 20.11.2019). (in Russian).
5. **Höne S., Montebaur A., Hehrkorn H.J.** Earth Fault Trails and Measurements in Rural 20 kV Networks as

as Basis for Improving the Performance of These Networks // Proc. 18th Intern. Conf. Electricity Distribution. Turin, 2005. Pp. 1—5.

6. **Höne S., Hentschel K.** Definition of Criteria to Operate 20 kV Networks with arc Suppression Coils According to Standards // Proc. 20th Intern. Conf. Electricity Distribution. Prague, 2009. Pp. 1—5.

7. **Lågland H., Kauhaniemi K.** Outage Cost Comparison of Different Medium Voltage Networks // Proc. 19th Intern. Conf. Electricity Distribution. Vienna, 2007. Pp. 1—4.

8. **Daqing J.Lv.** Triangle Development Zone Using 20 kV Voltage Level Distribution. Hangzhou: Zhejiang University School of Electrical Engineering, 2017.

9. **Пелисье Р.** Энергетические системы. М.: Высшая школа, 1982.

10. **Huang L. e. a.** 220/20 kV Power Supply Scheme in High Load Density Urban Areas // Power System Protection and Control. 2009. № 37 (20). Pp. 1—6.

11. **Лабузова А.В., Жигрова Ю.С.** Развитие электрических сетей напряжением 20 кВ в г. Москве // Электрические станции. 2017. № 5. С. 14—18.

12. **Майоров А.В.** Совершенствование технических решений по развитию структуры и повышению надежности эксплуатации электрической сети 20 кВ мегаполиса // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 4 (49). С. 30—35.

13. **Майоров А.В.** Особенности построения и направления развития системы защиты и автоматики электрической сети 20 кВ мегаполиса // Электрические станции. 2018. № 8. С. 25—30.

14. **Майоров А.В.** Применение защит с абсолютной селективностью и развитие автоматики в электрических сетях напряжением 20 кВ мегаполиса // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 6 (51). С. 32—37.

Basis for Improving the Performance of These Networks. Proc. 18th Intern. Conf. Electricity Distribution. Turin, 2005:1—5.

6. **Höne S., Hentschel K.** Definition of Criteria to Operate 20 kV Networks with arc Suppression Coils According to Standards. Proc. 20th Intern. Conf. Electricity Distribution. Prague, 2009:1—5.

7. **Lågland H., Kauhaniemi K.** Outage Cost Comparison of Different Medium Voltage Networks. Proc. 19th Intern. Conf. Electricity Distribution. Vienna, 2007:1—4.

8. **Daqing J.Lv.** Triangle Development Zone Using 20 kV Voltage Level Distribution. Hangzhou: Zhejiang University School of Electrical Engineering, 2017.

9. **Pelise R.** Energeticheskie Sistemy. M.: Vysshaya Shkola, 1982. (in Russian).

10. **Huang L. e. a.** 220/20 kV Power Supply Scheme in High Load Density Urban Areas. Power System Protection and Control. 2009;37 (20):1—6.

11. **Labuzova A.V., Zhigrova Yu.S.** Razvitie Elektricheskikh Setey Napryazheniem 20 kV v g. Moskve. Elektricheskie Stantsii. 2017;5:14—18. (in Russian).

12. **Mayorov A.V.** Sovershenstvovanie Tekhnicheskikh Resheniy po Razvitiyu Struktury i Povysheniyu Nadezhnosti Ekspluatatsii Elektricheskoy Seti 20 kV Megapolisa. Elektroenergiya. Peredacha i Raspredelenie. 2018;4 (49):30—35. (in Russian).

13. **Mayorov A.V.** Osobennosti Postroeniya i Napravleniya Razvitiya Sistemy Zashchity i Avtomatiki Elektricheskoy Seti 20 kV Megapolisa. Elektricheskie Stantsii. 2018;8:25—30. (in Russian).

14. **Mayorov A.V.** Primenenie Zashchit s Absolyutnoy Selektivnost'yu i Razvitie Avtomatiki v Elektricheskikh Setyakh Napryazheniem 20 kV Megapolisa. Elektroenergiya. Peredacha i Raspredelenie. 2018;6 (51):32—37. (in Russian).

Сведения об авторах:

Львов Михаил Юрьевич — доктор технических наук, руководитель департамента технической политики и стандартизации производственных процессов АО «ОЭК»

Камнев Дмитрий Юрьевич — магистрант кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: KamnevDY@mpei.ru

Information about authors:

Lvov Mikhail Yu. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Technical Policy and Standardization of Production Processes Dept., JSC «ОЭК»

Kamnev Dmitriy Yu. — Undergraduate of Power Electrical Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: KamnevDY@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 27.12.2019

The article received to the editor: 27.12.2019