

УДК 621.316.1.05

DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-75-81

СНИЖЕНИЕ НЕДООТПУСКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКЛОУЗЕРОВ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 10 кВ ГОМЕЛЬСКОГО РАЙОНА

**Г. И. СЕЛИВЕРСТОВ, П. В. ЛЫЧЕВ, Т. Н. САВКОВА,
М. В. ДЕДОЛКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

В. М. САВЕНОК, А. А. ЖУКОВСКИЙ

*Филиал «Гомельские электрические сети»
РУП «Гомельэнерго», Республика Беларусь*

Проанализированы состояние, проблемы и потенциал снижения недоотпуска электроэнергии и повышения надежности электроснабжения потребителей за счет применения реклоузеров в сельских электрических сетях 10 кВ Гомельского района. Приведены варианты места установки реклоузеров: одного реклоузера – при последовательном секционировании линии электропередачи с односторонним питанием и трех реклоузеров – в линии электропередачи с резервированием питания. Определены критерии оптимизации выбора места установки реклоузеров в сети: количество отключений потребителей фидера (линии или участка линии), длительность перерывов электроснабжения потребителей данного фидера, величина недоотпуска электрической энергии потребителям. Установлено, что для варианта установки трех реклоузеров с резервированием питания годовой недоотпуск электроэнергии снижается на 88,6 % по сравнению с базовым вариантом (без установки реклоузеров) и более чем в 3,3 раза, если сравнивать с вариантом установки одного реклоузера на линии электропередачи.

Ключевые слова: реклоузер, недоотпуск электроэнергии, количество отключений потребителя, продолжительность отключения потребителя, надежность.

Для цитирования. Снижение недоотпуска электроэнергии и повышение надежности электроснабжения потребителей за счет применения реклоузеров в сельских электрических сетях 10 кВ Гомельского района / Г. И. Селиверстов, П. В. Лычев, Т. Н. Савкова [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 3 (102). – С. 75–81. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-75-81

REDUCTION OF UNDERSUPPLY OF ELECTRICITY AND INCREASE OF RELIABILITY OF ELECTRICITY SUPPLY TO CONSUMERS BY USING RECLOSERS IN RURAL 10 kV ELECTRICAL NETWORKS OF GOMEL REGION

**G. I. SELIVERSTOV, P. V. LYCHEV, T. N. SAVKOVA,
M. V. DEDOLKO**

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

V. M. SAVENOK, A. A. ZHUKOVSKY

*Branch “Gomel Electric Networks” of RUE “Gomelenergo”,
the Republic of Belarus*

The article analyzes the status, problems and potential for reducing undersupply of electric power and increasing the reliability of consumer power supply through the use of reclosers in 10 kV rural electric networks of the Gomel region. The article presents options for installing reclosers: one recloser for sequential sectioning of a power transmission line with one-way power supply and three reclosers in a power transmission line with power supply redundancy. The criteria for optimizing the choice of recloser installation location in the network are defined: the number of disconnections of feeder consumers (line or line section), the duration of power supply interruptions for consumers of this feeder, the amount of undersupply of electric power to consumers. It has been established that for the option of installing three reclosers with power supply redundancy, the annual undersupply of electric power is reduced by 88.6% compared to the baseline option (without reclosers installation) and more than 3.3 times when compared to the options for installing one recloser on a power transmission line.

Keywords: recloser, undersupply of electricity, number of consumer outages, duration of consumer outage, reliability.

For citation. Seliverstov G. I., Lychev P. V., Savkova T. N., Dedolko M. V., Savenok V. M., Zhukovsky A. A. Reduction of undersupply of electricity and increase of reliability of electricity supply to consumers by using reclosers in rural 10 kV electrical networks of Gomel region. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 3 (102), pp. 75–81 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-75-81

Введение

Одними из наиболее слабых звеньев в системе электроснабжения являются распределительные электрические сети напряжением 6–10 кВ – конечный этап на пути электроэнергии от районной подстанции к потребителю [1]. Около 70 % всех нарушений электроснабжения происходит в воздушных линиях (ВЛ) этого класса напряжения. Современным способом повышения надежности электроснабжения становится секционирование линий электропередачи с помощью децентрализованно управляемых реклоузеров.

В Гомельском сельском районе электрических сетей (СРЭС) филиале «Гомельские сети» РУП «Гомельэнерго» ведутся активные работы по сокращению недоотпуска электроэнергии и повышению надежности электроснабжения потребителей, подключенных к ВЛ 6–10 кВ. Одним из вариантов решения этого вопроса является установка реклоузеров – автономных устройств, используемых для автоматического отключения и повторного включения ВЛ [2]. Так, к концу 2024 г. в Гомельском СРЭС их было установлено более 30 шт., при этом на пяти линиях установлено по 2 шт., на двух – по 3 шт., на двух – по 4 шт., на одной – 5 шт.

Увеличение количества всех установленных реклоузеров, в том числе и на одной ВЛ, позволяет устранить большую часть (путем повторного включения) повреждения или его локализовать, снизив тем самым недоотпуск электроэнергии потребителям. Как показывает опыт эксплуатации реклоузеров в Гомельском СРЭС, в период с 2021 по 2024 г. недоотпуск электроэнергии по всему СРЭС снизился на одно отключение с 354,7 до 182,8 кВт · ч, т. е. практически в два раза.

Цель настоящих исследований – анализ и оценка эффективности различных схем установки реклоузеров в сетях 10 кВ Гомельского района, а также определение оптимального варианта их размещения.

Основная часть

В соответствии со стратегией работы Гомельского СРЭС по обеспечению энергетической безопасности страны в данной работе выполнены исследования по определению недоотпуска электрической энергии, количества отключений фидера (ВЛ)

и длительности перерыва его электроснабжения для различных вариантов установки реклоузеров на ВЛ 10 кВ № 1878, подключенной к электрической подстанции (ПС) «Тереничи».

Приведем методику для расчета оптимального места установки реклоузера на ВЛ 10 кВ № 1878 [3–6].

Критерием оптимизации выбора места установки реклоузеров в сети с целью повышения надежности электроснабжения потребителей является минимизация соответствующих показателей надежности после установки реклоузеров:

1. Количество отключений потребителя или группы потребителей данного фидера, отключений/год:

$$\omega_{\pi} = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot L \rightarrow \min, \quad (1)$$

где ω_0 – удельная частота повреждений ВЛ 10 кВ, ед. на 100 км в год; L – длина участка линии, км.

2. Продолжительность отключения потребителей данного фидера, ч/год рассчитывается по выражению

$$T_{\pi} = \omega_{\pi} \cdot T \rightarrow \min, \quad (2)$$

где T – средняя продолжительность восстановления одного устойчивого повреждения, ч.

3. Величина недоотпуска электрической энергии потребителям определяется по формуле

$$\Delta W_{\text{но}} = 0,01 \omega_0 \cdot L \cdot T \cdot P_p \rightarrow \min; \quad (3)$$

$$P_p = S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi \cdot K_3, \quad (4)$$

где P_p – расчетная активная мощность нагрузки, кВт; $S_{\text{ном}}$ – полная номинальная мощность нагрузки, кВ · А; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности; K_3 – коэффициент загрузки.

Для учета влияния реклоузеров в схеме электроснабжения в приведенные выше формулы вводятся поправочные коэффициенты:

$$\Delta W'_{\text{но}} = 0,01 \cdot \omega_0 (1 - k_{\text{н.у}}) L \cdot T \cdot k_{\text{в.в}} \cdot P; \quad (5)$$

$$\omega'_{\pi} = 0,01 \cdot \omega_0 (1 - k_{\text{н.у}}) L; \quad (6)$$

$$T'_{\pi} = \omega'_{\pi} \cdot T \cdot k_{\text{в.в}}, \quad (7)$$

где $k_{\text{н.у}}$ – коэффициент, учитывающий наличие многократных автоматических повторных включений (АПВ) на устранение неустойчивых повреждений сети; $k_{\text{в.в}}$ – коэффициент, который учитывает влияние сокращения зоны поиска поврежденного участка за счет секционирования на общее время восстановления электроснабжения.

Для ВЛ № 1878 количество отключений составило: в 2019 г. – 1 – с общей продолжительностью отключения 0,88 ч; в 2020 г. – 2 и 2,95 ч; в 2022 г. – 2 и 4,52 ч; в 2023 г. – 4 и 3,51 ч; в 2024 г. – 2 и 7,8 ч соответственно.

На рис. 1 изображены варианты схемы исследуемой ВЛ, которая питается от шин ПС «Тереничи»; точки 1, 2, 3 – места последовательной установки реклоузе-

ра; I, II, III – участки ВЛ протяженностью 14,536, 7,373 и 6,552 км соответственно. На рис. 1, б показано, что ВЛ резервируется от трансформаторной подстанции (ТП) ТП-403; R1, R2, R3 – реклоузеры.

К ВЛ от шин ПС «Тереничи» до точки 3 (рис. 1, а, участок I) присоединены ТП, информация о которых приведена в табл. 1. На участке II присоединены ТП с суммарной мощностью 426,96 кВ · А, на участке III – 864,29 кВ · А.

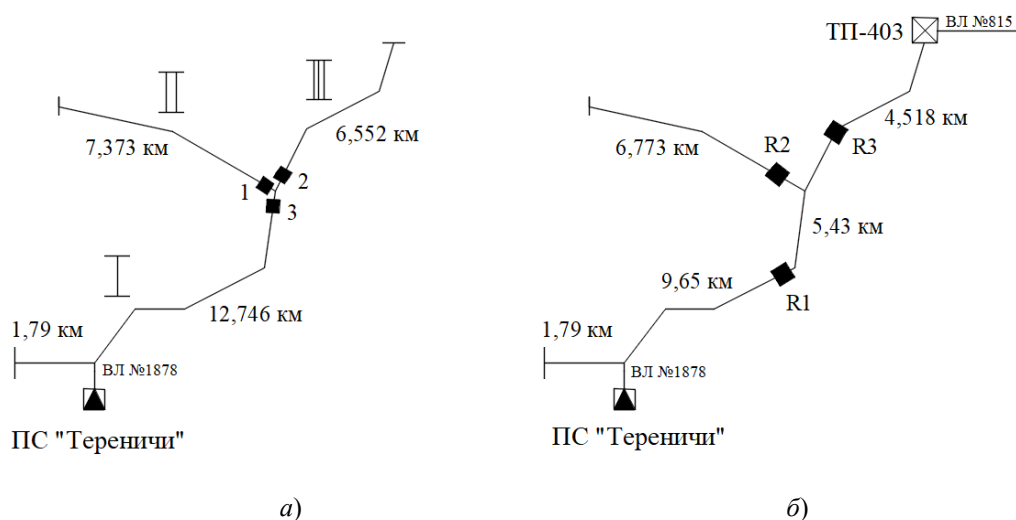


Рис. 1. Схемы вариантов исследуемой воздушной линии:
а – с односторонним питанием; б – с резервированием питания

Таблица 1

Характеристика трансформаторных подстанций воздушной линии № 1878
для участка от шин подстанции до точки 3 (участок I)

Номер ТП	Тип ТП	Количество трансформаторов	Мощность трансформаторов, кВ · А	Полная мощность S, кВ · А	Коэффициент мощности cosφ	Активная мощность P, кВт
272	КТП	1	1 · 40	28,40	0,92	26,13
398	КТП	1	1 · 40	27,20	0,92	25,02
790	ТП	2	2 · 250	395,50	0,80	316,40
454	КТП	1	1 · 63	39,06	0,92	35,94
587	КТП	1	1 · 63	39,06	0,92	35,94
588	КТП	1	1 · 63	42,84	0,92	39,41
406	МТП	1	1 · 40	31,16	0,70	21,81

В табл. 2 представлены результаты расчета недоотпуска, количества отключений потребителей, длительности перерывов электроснабжения для вариантов установки одного реклоузера с питанием от шин ПС «Тереничи».

Информация о количестве отключений потребителей данного фидера ω_n , длительности перерывов электроснабжения потребителей данного фидера T_n , величине недоотпуска электрической энергии потребителям $\Delta W_{но}$ при установке трех реклоузеров для различных участков ВЛ дана в табл. 3.

Таблица 2

**Результаты расчета показателей надежности участка электрической сети
для сравнительной оценки размещения одного реклоузера
в разных точках ее воздушной линии**

Место (точка) установки	Участок сети	$\Delta W_{\text{но}},$ кВт · ч/год	$\Delta W_{\text{отн}},$ %	$\omega_{\text{п}},$ год ⁻¹	$\omega_{\text{п.отн}},$ %	$T_{\text{п}},$ ч/год	$T_{\text{п.отн}},$ %
—	ВЛ 10 кВ № 1878	5284,28	—	1,67	—	3,27	—
1	II I + III	2025,86	61,66	0,34 1,34	79,64 19,76	0,4 1,57	87,77 51,99
2	III I + II	2225,13	57,89	0,31 1,34	81,44 19,76	0,37 1,57	88,69 51,99
3	II + III I	2151,45	59,29	0,66 1,34	60,48 19,76	0,77 1,57	76,45 51,99

Таблица 3

**Результаты расчета технической эффективности установки
трех реклоузеров для участков сети**

Участок сети	$\Delta W_{\text{но}},$ кВт · ч/год	$\omega_{\text{п}},$ год ⁻¹	$T_{\text{п}},$ ч/год
ВЛ 10 кВ № 1878 (без установки реклоузеров)	5284,28	1,67	3,27
От шин ПС до реклоузера R1	531,07	0,67	1,31
После реклоузера R1	79,95	0,34	0,67
После реклоузера R2	280,34	0,40	0,78
После реклоузера R3	379,06	0,27	0,53
ВЛ 10 кВ № 1878 (годовое значение $\Delta W_{\text{но}}$ с установкой трех реклоузеров)	1270,42	—	—

Для варианта ВЛ с установкой трех реклоузеров при резервировании питания потребителей от ТП-403 (рис. 1, б) приняты значения поправочных коэффициентов: $k_{\text{н.у.}}$, равным 0,2, для двукратного АПВ на реклоузерах и однократного АПВ в центре питания (ПС «Тереничи») и $k_{\text{в.в.}}$, равным 0,6, для 40 % времени ремонтных работ [3].

Результаты расчетов недоотпуска, количества отключений потребителей, длительности перерывов электроснабжения, выполненные по выражениям (5)–(7), для варианта установки трех реклоузеров с резервированием питания отражены в табл. 4.

Для сравнительной оценки между расчетным (Р) и базовым (Б) вариантами в табл. 3 и 4 приведено влияющее на надежность относительное процентное значение параметров $\Delta W_{\text{отн}}$, $\omega_{\text{п.отн}}$ и $T_{\text{п.отн}}$, определенных по выражениям [3]:

$$\Delta W_{\text{отн}} = \frac{\Delta W_{\text{Б}} - \Delta W_{\text{Р}}}{\Delta W_{\text{Б}}} 100 \%; \quad (8)$$

$$\omega_{\text{п.отн}} = \frac{\omega_{\text{п.Б}} - \omega_{\text{п.Р}}}{\omega_{\text{п.Б}}} 100 \%; \quad (9)$$

$$T_{\text{п.отн}} = \frac{T_{\text{п.Б}} - T_{\text{п.Р}}}{T_{\text{п.Б}}} 100 \%. \quad (10)$$

Таблица 4

**Результаты расчета технической эффективности установки трех реклоузеров
для участков сети с резервированием питания**

Участок сети	$\Delta W_{\text{но}},$ кВт · ч/год	$\Delta W_{\text{отн}},$ %	$\omega_{\text{п}},$ год ⁻¹	$\omega_{\text{п.отн}},$ %	$T_{\text{п}},$ ч/год	$T_{\text{п.отн}},$ %
ВЛ 10 кВ № 1878	5284,28	—	1,67	—	3,27	—
От шин ПС до реклоузера R1	254,91	95,17	0,54	67,67	0,63	80,73
После реклоузера R1	38,38	99,27	0,27	83,83	0,32	90,21
После реклоузера R2	134,56	97,45	0,32	80,84	0,37	88,67
После реклоузера R3	181,95	96,56	0,22	86,83	0,25	92,35
ВЛ 10 кВ № 1878 (годовое значение $\Delta W_{\text{но}}$ с установкой трех реклоузеров)	609,8	88,46	—	—	—	—

Исходя из выбранного варианта установки реклоузера суммарный годовой недоотпуск электроэнергии по линии в целом уменьшается на 57,89–61,66 %. С учетом недоотпуска электроэнергии и надежности оптимальным вариантом установки реклоузера будет первый вариант (табл. 2).

Для варианта установки трех реклоузеров с резервированием питания годовой недоотпуск электроэнергии понижается на 88,46 %, если сравнивать с базовым вариантом, и более чем в 3,3 раза – по сравнению с вариантами с установкой одного реклоузера на ВЛ, и, как следствие, с существенным повышением надежности электроснабжения потребителей (табл. 4).

Заключение

Таким образом, установлено, что в зависимости от выбранного варианта установки реклоузера годовой недоотпуск электроэнергии по линии в целом снижается на 57,89–61,66 %. Годовой недоотпуск электрической энергии для базового варианта составил 5284,28 кВт · ч/год, для первого варианта – 2025,86 кВт · ч/год, для второго варианта – 2225,13 кВт · ч/год, для третьего варианта – 2151,45 кВт · ч/год.

Отмечено, что по недоотпуску электрической энергии и надежности оптимальным вариантом установки реклоузера является первый вариант.

Определено, что для варианта установки трех реклоузеров с резервированием питания недоотпуск электроэнергии по сравнению с базовым вариантом понижается на 88,46 %. В итоге это существенно повышает надежность электроснабжения потребителей, в том числе и по сравнению с вариантами установки одного реклоузера на ВЛ.

Работа выполнялась в рамках Комплексной программы развития автоматизации Белорусской энергосистемы на 2018–2022 гг.

Литература

1. Петкевич, С. Л. Способы повышения надежности работы сетей 6–10 кВ / С. Л. Петкевич, А. И. Кривошеин, С. М. Силук // Актуальные проблемы энергетики : материалы 64-й науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Минск, апрель 2008 г. : в 2 ч. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: В. А. Анищенко [и др.]. – Минск, 2010. – Ч. 1. – С. 190–192.
2. Реклоузер вакуумный серии РВА/TEL : рук. по эксплуатации РЭ ТШФГ 674153.101. – Изм. 6. – М. : Рос. группа компаний «Таврида электрик», 2007. – 82 с.

3. Сазыкин, В. Г. Критерии оптимизации места установки реклоузера в распределительной сети 6–10 кВ / В. Г. Сазыкин, А. Г. Кудряков, А. А. Багметов // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2018. – № 1 (38). – С. 33–39.
4. Воротницкий, В. Э. Надежность распределительных электрических сетей 6 (10) кВ – автоматизация с применением реклоузеров / В. Э. Воротницкий, В. В. Воротницкий // *Новости электротехники*. – 2002. – № 5. – С. 22–25.
5. Сазыкин, В. Г. Децентрализованное управление распределительными электрическими сетями 6–10 кВ АПК / В. Г. Сазыкин, А. Г. Кудряков // *Актуальные вопросы технических наук: теоретический и практический аспекты* / В. Г. Сазыкин, А. Г. Кудряков ; под ред. И. В. Мирошниченко. – Уфа, 2017. – С. 64–87.
6. Лансберг, А. А. Разработка методики выбора места установки пунктов сетевого секционирования и резервирования в сельских электрических сетях 6–10 кВ / А. А. Лансберг // *Научный журнал молодых ученых*. – 2022. – № 5 (30). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metodiki-vybora-mesta-ustanovki-punktov-setevogo-sektsionirovaniya-i-rezervirovaniya-v-selskih-elektricheskikh-setyah-6> (дата обращения: 09.09.2025).

References

1. Petkevich S. L., Krivoshein A. I., Silyuk S. M. Ways to increase the reliability of networks 6–10 kV. *Aktual'nye problemy energetiki : materialy 64-i nauch.-tekhn. konf. studentov, magistrantov i aspirantov, Minsk, apr. 2008 g.* [Actual problems of energy: materials of the 64th scientific and technical conference of students, undergraduates and graduate students, Minsk, April, 2008]. Minsk, Belorusskii natsional'nyi tekhnicheskii universitet, 2010, part 1, pp. 190–192 (in Russian).
2. Rukovodstvo po ekspluatatsii RE TShFG 674153.101. Vacuum recloser series PBA/TEL. Moscow, Rosciiskaya gruppa kompanii “Tavrida elektrik”, 2007. 82 p. (in Russian).
3. Sazykin V. G., Kudryakov A. G., Bagmetov A. A. Criteria for optimizing the installation location of a recloser in a 6–10 kV distribution network. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2018, no. 1 (38), pp. 33–39 (in Russian).
4. Vorotnitskii V. E., Vorotnitskii V. V. Reliability of 6 (10) kV distribution networks-automation using reclosers. *Novosti elektrotekhniki*, 2002, no. 5, pp. 22–25 (in Russian).
5. Sazykin V. G., Kudryakov A. G. Decentralized control of 6–10 kV distribution power grids of the APC. *Aktual'nye voprosy tekhnicheskikh nauk: teoreticheskii i prakticheskii aspekty*, Ufa, 2017, pp. 64–87 (in Russian).
6. Lansberg A. A. Development of a methodology for selecting the location of network sectioning and backup points in rural 6–10 kV electrical networks. *Nauchnyi zhurnal molodykh uchenykh*, 2022, no. 5 (30). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metodiki-vybora-mesta-ustanovki-punktovsetevogo-sektsionirovaniya-i-rezervirovaniya-v-selskih-elektricheskikh-setyah-6> (accessed 09.09.2025).

Поступила 10.15.2025 г.