

## КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В ОТ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

*Р.Г. Валеев*

Предметом исследования данной работы является повышение уровня электробезопасности в электрических сетях напряжением 380 В с глухозаземленной нейтралью типа TN-C при однофазных коротких замыканиях на нулевой проводник и связанные с ним металлические конструкции. Согласно анализу аварийной статистики воздушные линии с неизолированными проводами являются наименее надежным элементом электрической сети – в 62 % случаев повреждения на них являются опасными для жизни людей и животных. В статье приведен краткий обзор литературы и обоснована актуальность разработки методики расчета, выбора и расстановки плавких предохранителей и автоматических выключателей по длине защищаемой линии, которые обеспечили бы 100%-ную зону ее защиты.

Рассматриваемая в статье концепция построения защиты электрических сетей напряжением 380 В с глухозаземленной нейтралью заключается в секционировании по длине воздушной линии плавкими предохранителями и автоматическими выключателями. Концепция построения показана на примере защиты ВЛ-0,38 кВ длиной 500 м и сечением проводов 35 мм<sup>2</sup>, которая питается от трансформатора номинальной мощностью 160 кВА со схемой соединения обмоток Y/YN и защищается плавкими предохранителями с разными номинальными токами.

Приведены графические зависимости, такие как изменение величины коэффициента чувствительности по длине линии, изменение зоны защиты в зависимости от тока плавкой вставки предохранителя для различных параметров электрической сети и др. Эти зависимости позволяют определить место установки плавких предохранителей или автоматических выключателей, обеспечивая отсутствие зон несрабатывания защит при времени срабатывания не более 5 с.

Результаты исследований предполагается использовать для построения защиты как простых магистральных, так и разветвленных с отпайками широко применяемых воздушных линий напряжением 380 В.

*Ключевые слова:* электрическая сеть напряжением 380 В; воздушная линия; однофазные короткие замыкания; электропоражения людей и животных; защита от однофазных коротких замыканий.

Электроснабжение городских поселков с малоэтажной застройкой, сельских потребителей осуществляется в основном по воздушным линиям электропередачи напряжением 380 В (ВЛ-0,38 кВ), выполненным неизолированными проводами. На 01.01.2013 г. по данным филиала ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго» общая протяженность ВЛ-0,38 кВ, состоящих на балансе «Челябэнерго», составляет 12629 км, из них только 249 км выполнены самонесущими изолированными проводами.

ВЛ-0,38 кВ являются наименее надежным элементом рассматриваемых систем электроснабжения. Анализ аварийной статистики по данным «Союзтехэнерго» и других источников информации показывает, что на 100 км электрических сетей напряжением 380 В приходится около 40–50 повреждений в год, причем около 62 % из них опасны для людей и животных [1–3]. Наиболее частым видом повреждений ВЛ-0,38 кВ являются однофазные короткие замыкания на нулевой рабочий провод и связанные с ним металлические конструкции (электрооборудование, заборы, гаражи, трубопроводы и т. д.). Возникающие при этом токи обуславливают появление опасных для людей и животных напряжений прикосновения и шага, а также могут являться причиной возникновения пожаров [4, 5].

Разработке релейной защиты ВЛ-0,38 кВ посвящено большое количество работ, проводимых с

начала 50–60-х годов прошлого столетия [1, 2, 4, 6, 7] и продолжающихся в настоящее время [8–10]. В электрических сетях с глухозаземленной нейтралью типа TN-C для защиты от однофазных коротких замыканий наибольшее распространение получили токовые защиты, построенные на использовании плавких предохранителей и автоматических выключателей. Результаты исследований [6–8, 10] показали, что зона действия защиты этими аппаратами распространяется только на начальную часть ВЛ-0,38 кВ и в некоторых случаях не превышает 100–300 м в зависимости от мощности питающих трансформаторов, сечения проводов и номинальных токов защитных аппаратов.

Эффективность защиты можно повысить путем секционирования линии, т. е. деления ее на участки, в начале которых следует устанавливать указанные защитные аппараты – это позволит повысить чувствительность защит [6]. Однако сегодня отсутствуют методики расчета, выбора и расстановки плавких предохранителей и автоматических выключателей по длине защищаемой линии, которые обеспечили бы 100%-ную зону ее защиты.

Из изложенного выше можно сделать вывод, что проблема защиты от однофазных коротких замыканий на нулевой рабочий провод ВЛ-0,38 кВ с неизолированными проводами является актуальной. В статье концепция построения представлена

на примере защиты ВЛ-0,38 кВ длиной 500 м и сечением проводов 35 мм<sup>2</sup>, которая питается от трансформатора номинальной мощностью 160 кВА со схемой соединения обмоток Y/Y<sub>н</sub> и защищается плавкими предохранителями с разными номинальными токами (построение защиты на основе автоматических выключателей качественно подобно).

Исходным материалом является определение минимального тока однофазного короткого замыкания (ОКЗ) в электрической сети напряжением до 1 кВ, на величину которого оказывает влияние достаточно большое количество факторов [11]. Величину тока ОКЗ можно представить функцией вида

$$I_{К.МИН}^{(1)} = f(X1, X2, X3, X4, X5), \quad (1)$$

где X1 – тип, мощность и схема соединения обмоток питающего сеть силового трансформатора; X2 – материал, сечение фазных и нулевого проводов, расстояние до места ОКЗ; X3 – увеличение активного сопротивления проводника при нагреве его током ОКЗ (эффект теплового спада тока ОКЗ); X4 – сопротивление дуги в месте замыкания; X5 – сопротивления контактов выключателей, соединительных контактов и т.д.

Расчет токов ОКЗ проводится с учетом эффекта теплового спада тока ОКЗ и сопротивления дуги в месте повреждения [12–15], который позволяет определить минимальные токи ОКЗ, существующие

венно влияющие как на чувствительность защиты, так и на зону ее действия.

Критерием оценки работоспособности любой защиты является ее коэффициент чувствительности

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{К.МИН}^{(1)}}{I_{\text{Ф.Н}}} \geq K_{\text{ч.ДОП}} = 3, \quad (2)$$

где I<sub>Ф.Н</sub> – номинальный ток плавкой вставки предохранителя; K<sub>ч.ДОП</sub> – минимально допустимое значение коэффициента чувствительности плавкой вставки.

На рис. 1, а представлены зависимости изменения коэффициентов чувствительности K<sub>ч</sub> = f(L) по длине линии с сечением проводов АС-3х35+35 мм<sup>2</sup>, питающейся от силового трансформатора мощностью 160 кВ·А со схемой соединения обмоток Y/Y<sub>н</sub> и защищаемой плавкими предохранителями с разными номинальными токами I<sub>Ф.Н</sub>. В общем случае для построения защиты необходимо построение целого семейства таких зависимостей для трансформаторов разной мощности от 100 до 630 кВ·А с разными группами соединения обмоток Y/Y<sub>н</sub>, Δ/Y<sub>н</sub> и всех применяемых сечений проводов от 16 до 95 мм<sup>2</sup>.

Зависимости K<sub>ч</sub> = f(L) при K<sub>ч.ДОП</sub> = 3 позволяют определять зоны защиты L<sub>3</sub> линии плавкими предохранителями. Например, при установке в начале линии плавкого предохранителя F1 с номинальным током I<sub>Ф.Н</sub> = 100 А его зона защиты L<sub>3</sub> составит не более 330 м. Таким образом, с учетом

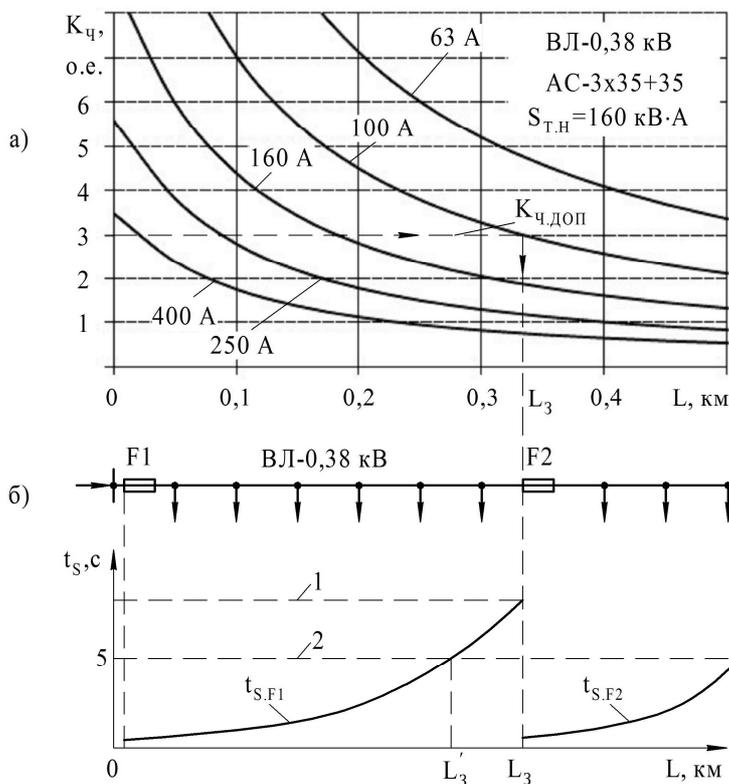


Рис. 1. Организация защиты ВЛ-0,38 кВ с помощью плавких предохранителей

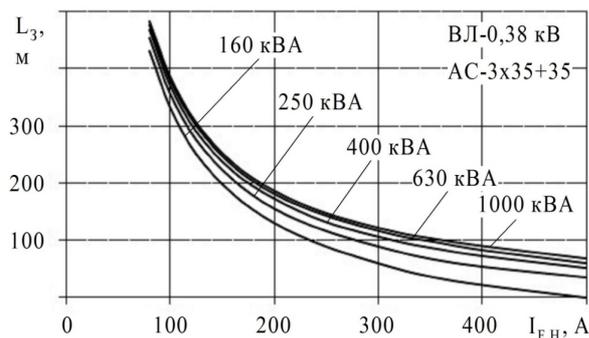


Рис. 2. Зоны защиты ВЛ-0,38 кВ при коэффициенте чувствительности  $K_{\text{ч}} = 3$

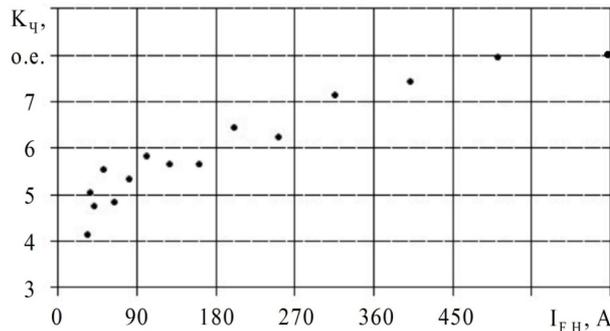


Рис. 3. Коэффициент чувствительности защиты ВЛ-0,38 кВ при  $t_{\text{s.F}} = 5$  с

предложения секционирования линии [6] место установки второго секционирующего предохранителя F2 должно находиться в конце зоны защиты предохранителя F1, не далее  $L_3 = 330$  м – см. рис. 1, б. На рис. 2 приведены зоны защиты ВЛ-0,38 кВ в зависимости от номинальных токов плавких предохранителей для случаев питания от трансформаторов с разной номинальной мощностью.

Номинальный ток плавкой вставки предохранителя F2 выбирается с учетом расчетных электрических нагрузок потребителей, питающихся на конечном участке линии, и максимально возможных эксплуатационных режимов их работы

$$I_{\text{F2.N}} \geq I_{\text{МАКС.РАБ}}, \quad (3)$$

где  $I_{\text{МАКС.РАБ}}$  – максимальный рабочий ток на конечном участке линии.

В 7-м издании ПУЭ появилось дополнительное требование к токовым защитам – время срабатывания  $t_{\text{s}}$  (отключения токов ОКЗ) не должно превышать 5 с [15] т. е. должны выполняться одновременно два условия

$$K_{\text{ч}} \geq 3 \quad \text{и} \quad t_{\text{s}} \leq 5 \text{ с}. \quad (4)$$

На рис. 1, б показаны кривые времени срабатывания  $t_{\text{s.F}} = f(L)$  плавких предохранителей F1 и F2 в зависимости от места возникновения ОКЗ.

Пунктирная линия 1 показывает достаточные условия для срабатывания плавкого предохранителя F1 по 1-му условию, а линия 2 – при одновременном выполнении обоих условий. Одновременное выполнение двух условий показывает, что зона защиты должна быть уменьшена до значения  $L'_3$ , т. е. предохранитель F2 следует поставить ближе к началу линии. Это, в свою очередь, говорит о том, что должна быть повышена чувствительность плавких предохранителей. В связи с этим, необходимо определить новые значения коэффициентов чувствительности  $K_{\text{ч}(t=5\text{ с})}$ , при которых время срабатывания предохранителей не должно превышать 5 с.

На рис. 3 приведены значения коэффициентов чувствительности в зависимости от номинальных токов плавких предохранителей  $K_{\text{ч}(t=5\text{ с})} = f(I_{\text{F.N}})$ . Здесь видно, что коэффициент чувствительности возрастает до значений 4,2–8.

С учетом уточнения параметров защиты определяется новое местоположения плавких предохранителей. Так как блок с предохранителями можно установить только на опоре, то их местоположение может сместиться ближе к питающей трансформаторной подстанции.

В результате выбора параметров защиты ВЛ-0,38 кВ может возникнуть необходимость ее секционирования на большее количество частей, т. е. возможна установка трех и более плавких предохранителей, которые бы обеспечили 100%-ную защиту линии.

### Заключение

1. Для практического использования предлагаемой концепции построения защиты рассчитаны и построены семейства кривых токов короткого замыкания, коэффициентов чувствительности, длины зон защиты в зависимости от мощности питающих электрическую сеть трансформаторов, сечения проводов воздушных линий, номинальных токов плавких предохранителей и автоматических выключателей.

2. Область применения концепции построения защиты распространяется как на рассмотренные простые магистральные, так и разветвленные с отпайками широко применяемые воздушные линии напряжением 380 В.

3. Варианты построения защиты в настоящее время анализируются с использованием компьютерной модели ВЛ-0,38 кВ, созданной на основе программного комплекса Matlab, далее будут проверяться на полномасштабной натурной модели ВЛ-0,38 кВ, построенной на полигоне «Челябэнерго» (напряжение 380 В, длина линии 470 м), с последующим внедрением в электрических сетях напряжением 380 В.

### Литература

1. Якобс, А.И. *Электробезопасность в сельском хозяйстве* / А.И. Якобс, А.В. Луковников. – М.: Колос, 1981. – 239 с.
2. Никольский, О.К. *Системы обеспечения электробезопасности в сельском хозяйстве* /

О.К. Никольский. – Барнаул: Алт. кн. изд-во, 1977. – 192 с.

3. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лецинская, В.И. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.

4. Александров, В.В. Электробезопасность сельскохозяйственного производства: справ. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.В. Александров. – М.: Нива России, 1992. – 221 с.

5. Электробезопасность. Теория и практика: учебное пособие для втузов / П.А. Долин, В.Т. Медведев, В.В. Крючков, А.Ф. Монахов; под ред. В.Т. Медведева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 280 с.

6. Спешаков, П.И. Проверка на автоматическое отключение линий в сетях до 1000 В / П.И. Спешаков. – М.: Энергия, 1971. – 86 с.

7. Григорьев, А.В. Защита сельских электросетей / А.В. Григорьев, А.И. Селивахин, В.И. Сукманов. – Алма-Ата: Кайнар, 1984. – 128 с.

8. Дубов, А.Л. Методика расчета режимов и комплексная защита воздушных линий напряжением до 1 кВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Л. Дубов. – Екатеринбург: УПИ, 1992. – 21 с.

9. Макаров, Д.А. Повышение эффективности систем зануления на основе обеспечения первич-

ных критериев электробезопасности: дис. ... канд. техн. наук / Д.А. Макаров. – Челябинск: ЮУрГУ, 2005. – 116 с.

10. Усихин, В.Н. О предельных длинах электрических сетей по условию отключения однофазных коротких замыканий / В.Н. Усихин // Промышленная энергетика. – 1991. – № 8. – С. 60–63.

11. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках переменного тока напряжением до 1кВ. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 42 с.

12. Методические указания по расчету токов короткого замыкания в сети напряжением до 1 кВ электростанций и подстанции с учетом влияния электрической дуги. – М.: СПО ОРГРЭС, 1993. – 50 с.

13. Егорушкин, И.О. Влияние теплового спада тока короткого замыкания на функционирование сельских электрических сетей напряжением 0,4 кВ: дис. ... канд. техн. наук / И.О. Егорушкин. – Красноярск: КрасГАУ, 2008. – 388 с.

14. Шиша, М.А. Влияние электрической дуги на ток КЗ в сетях напряжением до 1 кВ / М.А. Шиша, В.М. Александров, В.Н. Рычагов // Новости электротехники. – 2011. – № 6. – С. 38–41.

15. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 608 с.

Валеев Рустам Галимянович, ассистент, кафедры «Системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, vaaevrustam@mail.ru.

**Bulletin of the South Ural State University  
Series "Power Engineering"  
2013, vol. 13, no. 1, pp. 30–34**

## The Concept of Building Protection of Electric Networks 380 V Single-Phase Short-Circuit

R.G. Valeev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, vaaevrustam@mail.ru

The subject of study of this work is to improve electrical safety in networks 380V neutral to earth type TN-C single-phase short-circuit on the neutral conductor and the associated metal structures. According to the analysis of accident statistics overhead lines with bare wires are the least reliable element of the electric network – 62 % of the damage they are dangerous to people and animals. This article is a brief review of the literature and the urgency of the development of methods of calculation, selection and placement of fuses and circuit breakers along the protected line, which would provide 100 % of the area to protect it.

Considered in the design concept of the article protect electrical grids of 380 neutral to earth is the partitioning along the overhead lines fuses and circuit breakers. The concept of construction is shown by the example of security VL-0,38 kV 500 m long and a section of 35 mm square, which is powered by a transformer rated 160 kVA with a connection scheme Y/YH and protected by fuses with different rated currents.

Graphic shows the dependence such as the change in the ratio of sensitivity to length line, changing the zone of protection, depending on the current fuse links for various electrical parameters, etc. These relationships allow us to determine the place of installation of fuses or circuit breakers to ensure the absence of a failure of protection zones in response time less than 5 seconds.

Research results will be used to build the security of simple trunk and branches with a widely used taps overhead line voltage of 380 V.

*Keywords: electrical network voltage of 380 V, overhead lines, single-phase short-circuit; electric shock of people and animals, protection of single-phase short-circuit.*

### References

1. Yakobs A.I., Lukovnikov A.V. *Elektrobezopasnost v selskom khozyaystve* [Electrical safety in agriculture]. Moscow, Kolos Publ., 1981. 239 p.
2. Nikolskiy O.K. *Sistemy obespecheniya elektrobezopasnosti v selskom khozyaystve* [System for electrical safety in agriculture]. Barnaul, 1977. 192 p.
3. Budzko I.A., Leshchinskaya T.B., Sukmanov V.I. *Elektrosnabzheniye selskogo khozyaystva* [Power supply of agricultural], Moscow, 2000. 536 p.
4. Aleksandrov V.V. *Elektrobezopasnost selskokhozyaystvennogo proizvodstva: Spravochnik* [Electrical Safety for Agricultural Production Directory], Moscow, 1992. 221 p.
5. Dolin P.A., Medvedev V.T., Kryuchkov V.V., Monakhov A.F. *Elektrobezopasnost. Teoriya i praktika* [Electrical safety. Theory and practice]. Moscow, 2012. 280 p.
6. Spevakov P.I. *Proverka na avtomaticheskoye otklyucheniye liniy v setyakh do 1000 V* [Check for automatic disconnection of lines in systems up to 1000 V], Moscow, 1971. 86 p.
7. Grigoryev A.V., Selivakhin A.I., Sukmanov V.I. *Zashchita selskikh elektrosetey* [To protect rural electricity]. Alma-Ata, 1984. 128 p.
8. Dubov A.L. *Metodika rascheta rezhimov i kompleksnaya zashchita vozdukhnykh liniy napryazheniyem do 1 kV*, Ural Federal University, Yekaterinburg, 1992.
9. Makarov D.A. *Povysheniye effektivnosti sistem zanuleniya na osnove obespecheniya pervichnykh kriteriyev elektrobezopasnosti*, South Ural State University, Chelyabinsk, 2005.
10. Usikhin, V.N. Limit length of electrical networks for the condition of single-phase short-circuit shutdown [O predelnykh dlinakh elektricheskikh setey po usloviyu ot-klyucheniya odnofaznykh korotkikh zamykaniy], *Pro-myshlennaya energetika* [Industrial energy], 1991, no 8, pp. 60–63.
11. GOST 28249-93. *Korotkiye zamykaniya v elektroustanovkakh peremennogo toka napryazheniyem do 1kV*, Moscow, 1994. 42 p.
12. *Metodicheskiye ukazaniya po raschetu tokov korotkogo zamykaniya v seti napryazheniyem do 1 kV elektrostantsiy i podstantsiy s uchetom vliyaniya elektricheskoy dugi*, Moscow, 1993. 50 p.
13. Yegorushkin I.O. Vliyaniye teplovogo spada toka korotkogo zamykaniya na funktsionirovaniye selskikh elektricheskikh setey napryazheniyem 0,4 kV, Krasnoyarsk state agrarian university, Krasnoyarsk, 2008.
14. Shisha M.A., V.M. Aleksandrov, V.N. Rychagov Effect of electric arc fault current in networks with voltage up to 1 kV [Vliyaniye elektricheskoy dugi na tok KZ v setyakh napryazheniem do 1 kV], *Novosti elektrotekhniky*, 2011, no. 6, pp. 38–41.
15. *Pravila ustroystva elektroustanovok*. 7-e izd, Moscow, 2003. 608 p.

Поступила в редакцию 20.02.2013 г.