

6. B e s s o n o v, L. A. (1978) *Theoretical Basis of Electrotechnics: Electric Circuits*. 7th ed. Moscow, Vysshaya Shkola. 528 p. (in Russian).
7. L e d o v s k i y, A. N. (1985) *Electric Machines with High-Coercivity Constant Magnet*. Moscow, Energoatomizdat. 168 p. (in Russian).
8. M i l l e r, T. J. E. (1989) *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*. Oxford, Clarendon Press. 207 p.
9. I v a n o v-S m o l e n s k i y, A. V. (1980) *Electrical Machinery*. Moscow, Energy. 928 p. (in Russian).
10. B r o n s h t e i n, I. N., & Semendyaev, K. A. (1981) *Book of Reference on Mathematics for Engineers and Students of Technical Colleges*. Moscow, Nauka. Chief-Editorial Office of Physico-Mathematical Literature. 720 p. (in Russian).

Представлена кафедрой электропривода
и автоматизации промышленных установок
и технологических комплексов

Поступила 13.04.2015

УДК 621.316

ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ИНДУЦИРУЕМЫХ ТОКОВ В ЭКРАНАХ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Магистр техн. наук ОЛЕКСЮК И. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: ilya.oleks@gmail.com

Силовые электрические кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена в настоящее время применяются при проектировании систем электроснабжения новых объектов, но более высокая стоимость, отсутствие полной нормативно-технической базы для проектирования, монтажа и эксплуатации, а также некоторые конструктивные особенности кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена затрудняют их широкое внедрение.

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена выпускаются преимущественно в однопроволочном исполнении и имеют комбинированный медный экран, площадь поперечного сечения которого может быть различной при одинаковом сечении токопроводящей жилы. Заземление экранов кабелей с обоих концов приводит к появлению токов в экранах. В ходе эксплуатации кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена выяснилось, что индуцируемые токи в экранах кабелей могут достигать величин, соизмеримых с токами в жилах, что, в свою очередь, приводит к снижению уровня электробезопасности, повреждению кабельных линий и экономическому ущербу. Токи в экранах могут индуцироваться как в симметричных (нормальных и аварийных), так и в несимметричных режимах работы сети, причем значение индуцируемых токов может достигать 80 % от тока в жиле. Величина индуцируемого в экране тока зависит от многих факторов: режима нейтрали электрической сети, значений продольных токов в жилах в нормальных и аварийных режимах, вида повреждения, площади поперечного сечения экрана, расположения кабелей друг относительно друга, расстояния между ними.

Экспериментально подтверждено наличие индуцированного тока в экране кабеля под действием тока в жиле, измерено его значение. Установлено, что индуцирование опасных токов в экранах кабелей требует разработки мероприятий по снижению их значений.

Ключевые слова: индуцируемый ток, силовой электрический кабель, сшитый полиэтилен, изоляция.

Ил. 6. Табл. 3. Библиогр.: 10 назв.

ESTIMATION OF INDUCED CURRENTS IN THE SHIELDS OF ELECTRICAL POWER CABLES WITH XLPE INSULATION

OLEKSYUK I. V.

Belorussian National Technical University

Electrical power cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation (XLPE-insulation) are currently utilized in projects of the electric-power supply systems of modern facilities. However, the higher costs, the incomplete design, installation and maintenance normative-technical basis as well as certain constructional features of the XLPE-insulated cable lines hinder their large-scale implementation.

The cables with XLPE insulation are mostly produced in a single-conductor core version being provided with a composite copper shield whose cross-section may vary while the electric conductor cross-section remains uniform. Earthing the cable shields on both sides causes the flow of electricity in them. The course of operational service of the XLPE-insulated cable lines revealed the following fact – the currents induced in the cable shields can run up to the levels commensurable with those in the conductor-cores themselves. That, in its turn, leads to electrical safety-level reduction, cable lines failure, and economic losses. The currents induced in the shields may occur both in symmetric (normal and emergency) and asymmetric operating modes of the power grid with values of the induced currents reaching 80 % of the conducting core currents. Many factors affect the level of the current induced in the shield: the midpoint conductor modes, the values of the core longitudinal currents in the normal and emergency operating modes, failure mode, the cross-section area of the shield, the cables mutual disposition, and the distance between them.

The paper claims experimental existence conformation of the cable-shield current induced by that in the conductor-core and demonstrates its measured value. The author establishes that induction of dangerous currents in the cable shields demands elaboration of measures on reducing their level.

Keywords: induced current, electric power cable, cross-linked polyethylene, insulation.

Fig. 6. Tab. 3. Ref.: 10 titles.

Силовые электрические кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) в настоящее время применяются при проектировании систем электроснабжения новых объектов, но более высокая стоимость, отсутствие полной нормативно-технической базы для проектирования, монтажа и эксплуатации, а также некоторые конструктивные особенности кабельных линий с изоляцией из СПЭ затрудняют их широкое внедрение. Кабели с изоляцией из СПЭ выпускаются преимущественно в одножильном исполнении и имеют комбинированный медный экран, площадь поперечного сечения которого может быть различной при одинаковом сечении токопроводящей жилы. Заземление экранов кабелей с обоих концов приводит к появлению токов в экранах. В ходе эксплуатации кабельных линий с изоляцией из СПЭ выяснилось, что индуцируемые токи в экранах кабелей могут достигать величин, соизмеримых с токами в жилах, что в свою очередь приводит к снижению уровня электробезопасности, повреждению кабельных линий и экономическому ущербу.

Задача исследований автора состояла в экспериментальном подтверждении наличия индуцированного тока в экране кабеля под действием тока в жиле, а также в измерении его значения. Индуцирование опасных токов в экранах кабелей приведет к необходимости разработки мероприятий по снижению их значений.

Силовой электрический кабель, применяемый для сооружения кабельной линии (КЛ), проходит этапы изготовления, монтажа и эксплуатации. Каждая из перечисленных стадий требует соответствующих испытаний, проверяющих техническое состояние кабеля и, следовательно, пригодность его применения или возможность дальнейшей эксплуатации. На стадии изготовления определяется соответствие физических и электрических параметров кабеля стандартизированным значениям. При проектировании кабельной линии производится выбор площади поперечного сечения токопроводящих жил и экрана кабеля, способа укладки одножильных кабелей в траншею (в плоскости или треугольником), а также способа соединения и заземления экранов.

Одножильные кабели с изоляцией из СПЭ имеют одну отличительную особенность по сравнению с трехжильными кабелями с бумажной изоляцией – в одножильных присутствует экран [1–3], в котором могут индуцироваться токи под действием продольного тока в жиле [4, 5]. Согласно публикациям [6–8], токи в экранах могут индуцироваться как в симметричных (нормальных и аварийных), так и в несимметричных режимах работы сети, причем значение индуцируемых токов может достигать 80 % от тока в жиле. Величина индуцируемого в экране тока зависит от многих факторов: режима нейтрали электрической сети, значений продольных токов в жилах в нормальных и аварийных режимах, вида повреждения, площади поперечного сечения экрана, расположения кабелей друг относительно друга, расстояния между ними.

Для измерения значений индуцируемых токов в экранах силовых электрических кабелей проведена серия испытаний на лабораторной установке, имитирующей заземление экрана кабеля с обоих концов кабельной линии (рис. 1). Напряжение однофазного переменного тока от сети через лабораторный трансформатор Т1 подавалось на понижающий трансформатор Т2, к выходу которого подключали испытуемый образец, представлявший собой отрезок кабеля марки АПвВнг(В)-LS-1х120/35-10 длиной $L = 3$ м. Ток в жиле измеряли амперметром непосредственного включения РА1, ток в экране без разрыва цепи – вольтамперфазометром при помощи клещевой приставки.

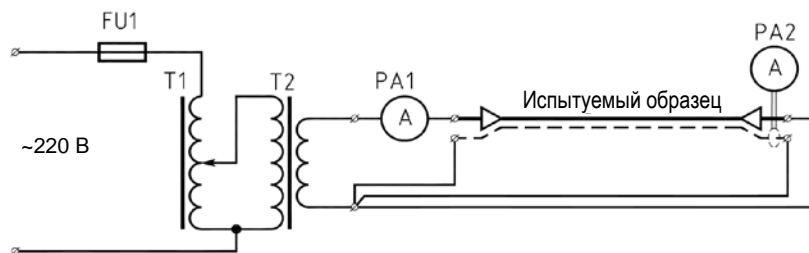


Рис. 1. Схема установки для испытания № 1: Т1 – лабораторный автотрансформатор ЛАТР-1М ($U_n = 220$ В; $I_n = 9$ А); Т2 – понижающий трансформатор Т-74 ($P_n = 270$ Вт; $U_n = 380/127/6$ В; $I_n = 0,71/2,2$ А, 50 Гц); РА1 – амперметр Д553 (ГОСТ 8711–60), класс точности 0,2 %, конечные значения диапазонов измерений, А: 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 10,0; 25,0; 50,0; РА2 – вольтамперфазометр М2, класс точности 2,0 % в диапазоне измерений 1,4–10 А

Порядок проведения испытания был следующим: при помощи лабораторного автотрансформатора в жиле устанавливали определенное значение тока, после чего снимали его показание в экране кабеля. Для соединения экрана кабеля с одной из клемм на выходе трансформатора Т2, условно принятой в качестве «земли», использовали медные многопроволочные (гибкие) провода сечением 3 мм². В ходе второго этапа испытания площадь поперечного сечения соединительных проводов была удвоена. Результаты измерений сведены в табл. 1, по данным которой построены графики зависимости токов в экране от продольных токов в жиле (рис. 2).

Таблица 1

Результаты измерений индуцируемых токов в экране кабеля для испытания № 1

Ток в жиле $I_{ж}$, А	Ток в экране при сечении соединительных проводов, мм ²			
	3		6	
	$I_{э}$, А	$(I_{э}/I_{ж}) \cdot 100 \%$	$I_{э}$, А	$(I_{э}/I_{ж}) \cdot 100 \%$
5	0,118	2,36	0,223	4,46
10	0,234	2,34	0,454	4,54
15	0,340	2,27	0,656	4,37
20	0,462	2,31	0,873	4,37
25	0,588	2,35	1,130	4,52
30	0,716	2,39	1,313	4,38
35	0,814	2,33	1,560	4,46
40	0,937	2,34	1,760	4,40

Как видно из табл. 1, в экране кабеля индуцируются токи, не превышающие 5 % от тока в жиле.

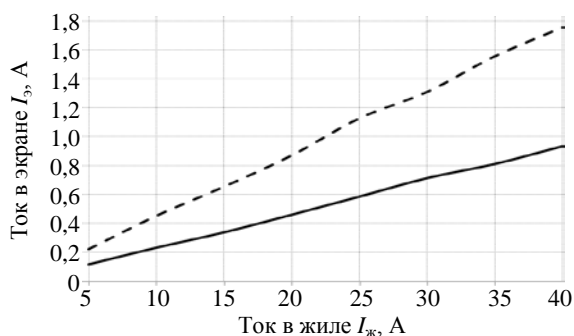


Рис. 2. Зависимость индуцируемого тока в экране от тока в жиле для испытания № 1:
 — — площадь поперечного сечения соединительных проводов $s = 3 \text{ мм}^2$;
 - - - — то же 6 мм^2

Второе испытание проводили по схеме, представленной на рис. 3. Для уменьшения влияния на результаты испытания использованы соединительные провода ПВ3 сечением 16 мм².

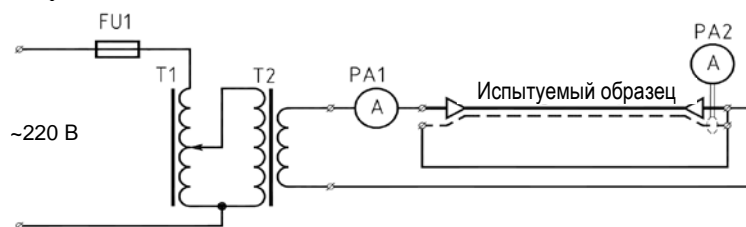


Рис. 3. Схема установки для испытания № 2

Ход проведения эксперимента аналогичен испытанию № 1. Результаты измерений для испытания № 2 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений индуцируемых токов в экране кабеля для испытания № 2

Ток, А, в		$(I_3/I_{ж}) \cdot 100 \%$
жиле $I_{ж}$	экране I_3	
5	0,833	16,66
10	1,650	16,50
15	2,510	16,73
20	3,310	16,55
25	4,170	16,68
30	5,040	16,80
35	5,850	16,71
40	6,620	16,55

Как видно из табл. 2, в экране кабеля индуцируются токи, не превышающие 17 % от тока в жиле.

Для испытания № 3 собирали установку, схема которой представлена на рис. 4. В этом случае использовали два одинаковых испытательных образца, в качестве которых выступали два отрезка кабеля марки АПВВнг(В)-LS-1х120/35-10 длиной по 3 м.

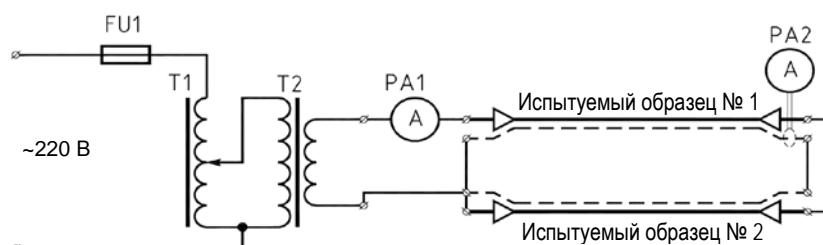


Рис. 4. Схема установки для испытания № 3

Сечение соединительных проводов увеличивали до 32 мм², т. е. использовали два провода марки ПВЗ сечением 16 мм². Таким образом, сечение соединительных проводов было приближено к сечению экрана кабеля. Результаты измерений для испытания № 3 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений индуцируемых токов в экране кабеля для испытания № 3

Ток, А, в		$(I_3/I_{ж}) \cdot 100 \%$
жиле $I_{ж}$	экране I_3	
5	2,05	41,0
10	4,08	40,8
15	6,15	41,0
20	8,12	40,6
25	10,22	40,9
30	12,12	40,4
35	14,04	40,1
40	–	–

Как видно из табл. 3, индуцируемый ток в экране достигает до 41 % от тока в жиле.

Графики зависимости индуцируемого тока в экране от тока в жиле для испытаний № 2 и 3 представлены на рис. 5.

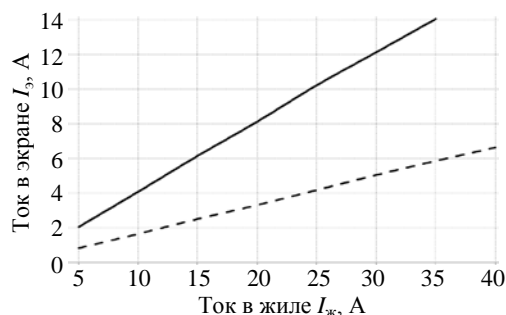


Рис. 5. Зависимость индуцируемого тока в экране от тока в жиле:
 — $s = 32 \text{ мм}^2$; - - - 16 мм^2

Серия кривых, построенных по результатам испытаний, иллюстрирующих зависимость индуцируемых токов в экране одножильного кабеля от сечения соединительных проводов, показана на рис. 6.

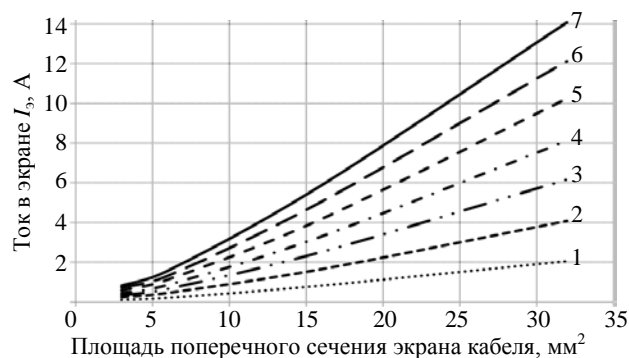


Рис. 6. Зависимость индуцируемого тока в экране от сечения соединительных проводов в цепи экрана: 1 – $I_{ж} = 5 \text{ А}$; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 20; 5 – 25; 6 – 30; 7 – 35 А

Анализируя полученные результаты по испытаниям № 1–3, можно отметить, что:

- заземление экранов кабелей на обоих концах кабельной линии приводит к возникновению индуцируемых токов в экранах кабелей;
- значениями индуцируемых токов в экранах нельзя пренебрегать, так как они достигают до 41 % от токов в жилах;
- значения индуцируемых токов в экранах кабелей существенно зависят от электрической проводимости, а следовательно, от площади поперечного сечения экрана кабеля.

Наличие токов в экранах одножильных кабелей приводит к дополнительным потерям электроэнергии, которые на протяженных линиях электропередачи влекут за собой существенный экономический ущерб [9, 10]. Уменьшение площади поперечного сечения экранов кабелей снижает индуцируемые токи в экранах кабелей, но вместе с тем и ухудшает термическую стойкость экранов при коротких замыканиях. Поэтому при проектировании кабельной линии с кабелями с изоляцией из СПЭ важно правильно выбрать площадь поперечного сечения экранов кабелей, а также способ их заземления.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальным путем подтверждено индуцирование токов в экранах одножильных силовых кабелей при заземлении экранов на обоих концах кабельной линии.

2. Индуцируемые токи в экранах кабелей зависят от площади поперечного сечения экрана и соизмеримы с токами в жилах.

3. Индуцирование в экранах кабелей токов, соизмеримых с токами в жилах, создает необходимость разработки мероприятий по снижению их значений при проектировании и эксплуатации кабельных линий с одножильными кабелями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л а р и н а, Э. Т. Силовые кабели и кабельные линии: учеб. пособие для вузов / Э. Т. Ларина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.
2. О с н о в ы кабельной техники / В. А. Привезенцев [и др.]. – М.: Энергия, 1967. – 464 с.
3. О с н о в ы кабельной техники: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Леонов [и др.]; под ред. И. Б. Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
4. Н е в а р, Г. А. Схемы соединения экранов одножильных кабелей в трехфазных электрических сетях / Г. А. Невар, В. Н. Радкевич, В. Б. Козловская // Энергия и Менеджмент. – 2010. – Март–апрель. – № 2 (53). – С. 4–7.
5. К о в р и г и н, Л. А. Продольные токи в экранах одножильных кабелей / Л. А. Ковригин // КАБЕЛЬ-news. – 2009. – № 3. – С. 56–58.
6. Д м и т р и е в, М. В. Заземление однофазных экранов кабелей 6–10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена / М. В. Дмитриев, Г. А. Евдокунин // Кабель-news. – 2008. – Март. – № 3. – С. 56–61.
7. Д м и т р и е в, М. В. Экраны однофазных кабелей 6–500 кВ. Ошибки при выполнении схем заземления / М. В. Дмитриев // Новости электротехники. – 2013. – № 6 (84). – С. 50–53.
8. Д м и т р и е в, М. В. Однофазные силовые кабели 6–500 кВ. Расчет термической стойкости экранов при КЗ / М. В. Дмитриев, Г. А. Евдокунин // Новости электротехники. – 2008. – № 2 (50). – С. 104–108.
9. Д м и т р и е в, М. В. Однофазные силовые кабели 6–500 кВ. Потери в экранах и эффективность транспозиции / М. В. Дмитриев, Г. А. Евдокунин // Новости электротехники. – 2009. – № 1 (55). – С. 2–5.
10. Б а р д а к о в, О. А. Повышение передаваемой мощности кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / О. А. Бардаков // Энергосберегающие технологии: международная молодежная конференция, 28–30 июня 2011 г.: материалы докладов. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2011. – Т. 2. – С. 209–211.

REFERENCES

1. L a r i n a, E. T. (1984) *Power Cables and Cable Lines*. Moscow, Energoatomizdat. 368 p. (in Russian).
2. P r i v e z e n t s e v, V. A., Grodnev, I. I., Kholodnyi, S. D., & Riazanov, I. B. (1967) *Principia of the Cable Technology*. Moscow, Energy. 464 p. (in Russian).
3. L e o n o v, V. M., Peshkov, I. B., Riazanov, I. B., & Kholodnyi, S. D. (2006) *Principia of the Cable Technology*. Moscow, Publishing Center 'Academy'. 432 p. (in Russian).
4. N e v a r, G. A., Radkevich, V. N., & Kozlovskaya, V. B. (2010) Connecting Diagram of Single-Core Cable Screens in Three-Phase Electric-Power Grids. *Energiia i Menedzhment* [Energy and Management], 2 (53), 4–7 (in Russian).
5. K o v r i g i n, L. A. (2009) Longitudinal Currents in the Screens of the Single-Core Cables. *KABEL"-News* [Cable-News], 3, 56–58 (in Russian).
6. D m i t r i e v, M. V., & Yevdokunin, G. A. (2008) Earthing of the Single-Phase Cable Screens of 6–10 kV with Cross-Linked Polyethylene Insulation. *KABEL"-News* [Cable-News], 3, 56–61 (in Russian).
7. D m i t r i e v, M. V. (2013) Single-Phase Cable Screens of 6–500 kV. Faults in Accomplishing the Earthing Schemes. *Novosti Elektrotehniki* [Electrotechnics News], 6 (84), 50–53 (in Russian).
8. D m i t r i e v, M. V., & Yevdokunin, G. A. (2008) Single Phase Power Cables 6–500 kV. Evaluation of the Short-Circuit Heat Endurance of the Screens. *Novosti Elektrotehniki* [Electrotechnics News], 2 (50), 104–108 (in Russian).
9. D m i t r i e v, M. V., & Yevdokunin, G. A. (2009) Single Phase Power Cables 6–500 kV. The Screen Losses and the Transposition Effectiveness. *Novosti Elektrotehniki* [Electrotechnics News], 1 (55), 2–5. (in Russian).
10. B a r d a k o v, O. A. (2011) Transmission Capacity Increase of the Cables with the Cross-Linked Polyethylene Insulation. *Energy-Efficient Technology: International Youth Conference*, June 28–30 2011. Materials Reports. Vol. 2. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 209–211 (in Russian).

Представлена кафедрой электрических систем

Поступила 22.04.2015