

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ, ИХ ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ И СПОСОБЫ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ЭКРАНОВ

*Зроблений огляд робіт, в яких досліджуються шляхи зменшення магнітних полів силових кабельних ліній, стосовно кабелів з ізоляцією із шитого поліетилену. Аналізуються різні аспекти впливу конструктивного виконання екранів однофазних силових кабелів на тепловий режим трьохфазної кабельної лінії, розглянуті питання електромагнітної сумісності силових кабелів.*

*Сделан обзор работ, в которых исследуются способы снижения магнитных полей силовых кабельных линий, применительно к кабелям с изоляцией из шитого полиэтилена. Анализируются различные аспекты конструктивного исполнения экранов однофазных силовых кабелей на тепловой режим трехфазной кабельной линии, рассмотрены вопросы электромагнитной совместимости силовых кабелей.*

### ВВЕДЕНИЕ

Проблемам, связанным с различными аспектами электромагнитных процессов, происходящих в экранах силовых кабелей, посвящено достаточно большое количество работ. Это, в первую очередь, связано с большим влиянием, которое оказывают экранирующие элементы конструкции кабеля на его тепловой режим работы, а значит и на пропускную способность кабельной линии в целом. Такое влияние связано с потерями энергии на продольные и вихревые токи (что в свою очередь зависит от способа соединения экранов), которые протекают в экранах кабельной линии. Национальные и международные нормативные документы, например, [1, 2] дают рекомендации относительно учета потерь обусловленных протеканием продольных и вихревых токов при различных способах прокладки силовых кабелей, а также при различных способах соединения экранов, то есть – с одной стороны кабельной линии, с двух сторон кабельной линии, применение транспозиции экранов, либо их секционирование. Кроме того, важным аспектом является определение потенциала, наведенного на незаземленном конце экрана.

Следует отметить, что для одножильных кабелей, в конструкции которых присутствует броня из магнитных стальных проволок, указанные в [1, 2] рекомендации относительно учета общих потерь в оболочке и в броне дают несколько завышенные значения, для обеспечения безопасной работы при номинальной нагрузке.

Другим важным аспектом, который обуславливает актуальность рассмотрения вопросов конструктивного исполнения экранов с точки зрения их влияния на обеспечение теплового режима и пропускную способность кабельной линии, является вопрос обеспечения электромагнитной совместимости кабельных линий, который рассматривается в целом ряде работ. В некоторых из них снижение магнитных полей достигается введением в конструкцию ферромагнитных элементов, что особенно остро определяет необходимость более тщательного учета некоторых важных факторов, таких как дополнительные потери в экранирующих элементах, а также влияние этих элементов, как на индуктивность кабельной линии, так и на взаимную индуктивность между жилой и экраном.

### АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Как уже указывалось, при обеспечении электромагнитной совместимости кабельных линий, кроме снижения магнитного поля до необходимого уровня, следует учитывать дополнительный нагрев экранирующих элементов и, как следствие, снижение пропускной способности кабельной линии. В качестве примера такого негативного влияния можно привести данные работы [3], где рассматривались аспекты, связанные с прокладкой силовых кабелей в стальных трубах (при их пофазной прокладке), что в рассматриваемом случае, правда, производилось для обеспечения необходимых требований обеспечения механической целостности кабеля. Согласно измерениям, проведенным в [3], температура стальной трубы, в которой был проложен кабель составляла 140-145 °С, что и послужило причиной выхода кабеля из строя.

Переходя к общим вопросам, связанным с конструктивным исполнением экранов кабелей, следует отметить, что протекание по экрану токов короткого замыкания обуславливает сложность выбора его сечения. С точки зрения обеспечения надежной работы и термической устойчивости экрана при коротких замыканиях сечение экрана необходимо увеличивать. В то же время, с точки зрения обеспечения максимальной пропускной способности, сечение экрана необходимо уменьшать. Кроме того, как результат, сечение экрана влияет и на поля рассеивания кабельных линий. При соединении экранов с двух сторон система токов в них сдвинута на 180° по отношению к токам в жиле, что позволяет значительно компенсировать магнитное поле кабельной линии. Для собственного поля, благодаря характеру протекания вихревых токов, по терминологии [4], экран кабеля является открытым, неправильным экраном, для внешних полей экран кабеля – замкнутая в электромагнитном смысле оболочка. Из рассматриваемых в литературе способов снижения магнитных полей кабельных линий наиболее распространенными способами являются следующие [5]:

1. Снижение магнитных полей путем изменения геометрического расположения фаз и расстояния между фазами. Так, симметричное расположение фаз

(по вершинам равностороннего треугольника) более благоприятно для компенсации внешних магнитных полей по сравнению с их расположением в плоскости.

2. Применение электромагнитных и магнитных экранов. В литературе рассматриваются как плоские, так и замкнутые экраны, в том числе и двойные. Кроме того, согласно литературным данным, применение магнитных экранов может быть продиктовано не только целями обеспечения электромагнитной совместимости, а и целями уменьшения потерь от протекания продольных токов. Так, применение в [6] магнитодиэлектриков в экспериментальной конструкции кабеля между жилой и медным экраном при экспериментальной проверке позволило снизить продольные токи на 80% по сравнению с традиционной конструкцией кабеля без магнитодиэлектрика.

3. Применение компенсирующих витков (compensating passive (active) loops) рассмотренное в [7] на примере кабельной линии с экранами, заземленными с одной стороны. Здесь экранирующий эффект достигается за счет взаимодействия собственного поля кабельной линии с полем токов индуктируемых в специально проложенных проводящих замкнутых контурах.

Кроме того, силовой кабель с двойным экраном, внутренняя часть которого представляла обычный проволочный медный экран, а внешняя – ленточный ферромагнитный, был теоретически и экспериментально исследован в целом цикле работ [8-10]. При этом медные экраны были соединены с двух сторон кабельной линии, ферромагнитный экран заземлялся только с одной стороны. Интересно отметить, что если в [6] целью применения магнитодиэлектрика было уменьшение потерь обусловленных продольными токами, то в указанном выше цикле работ магнитный экран применялся для прямо противоположных целей – с целью увеличения продольных токов, для достижения необходимого экранирующего эффекта. Указанные конструктивные изменения были предложены для кабелей, проложенных в плоскости, как для наиболее неблагоприятного их геометрического расположения с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости. Практическая реализация указанных конструктивных изменений для 20 кВ кабеля была проведена в [10]. Кроме того, кабельная линия, проложенная в стальной трубе с целью обеспечения электромагнитной совместимости, рассматривалась в [11], применение  $U$ -образных экранов, из алюминия и ферромагнитных материалов, с поперечным перекрытием было рассмотрено в [12, 13]. В качестве примера работ, в которых рассматривается электромагнитное экранирование трехфазных токопроводов можно привести статьи [14, 15]. В [14] в качестве экранов рассмотрено применение двух алюминиевых  $U$ -образных элементов, были определены оптимальные расстояния с точки зрения эффективности экранирования между элементами экрана, в [15] проведено экспериментальное исследование эффективности экранирования трехфазного токопровода плоским двойным электромагнитным экраном.

Рассматривая случай заземления экранов только с одной стороны кабельной линии, то есть для того случая, когда потери обусловлены протеканием только вихревых токов, потери, обусловленные ими, а

также выражения для коэффициентов экранирования находят при рассмотрении потока комплексного вектора Пойнтинга в радиальном направлении, через стенку экрана:

$$\dot{S} = \dot{E}_z \times \dot{H}_\varphi, \quad (1)$$

где  $\dot{E}_z$  и  $\dot{H}_\varphi$  – комплексные амплитуды соответственно напряженности продольной составляющей электрического и тангенциальной составляющей магнитного полей (сопряженное значение).

При учете потерь, обусловленных протеканием только вихревых токов, для одиночного проводника с током и магнитным экраном – простейшей модели для рассмотрения потерь от вихревых токов, можно попытаться оценивать потери используя результаты Я. Туровского [4, 16]. Указанные результаты были получены для квазистационарного приближения и поля, которое меняется по гармоническому закону, при интегрировании уравнения для экрана:

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{E}_m}{\partial r} = \alpha^2 \dot{E}_m, \quad (2)$$

где  $\alpha = (j\omega\mu\gamma)^{0,5}$ ,  $\omega$  – угловая частота,  $\gamma$ ,  $\mu$  – соответственно удельная проводимость и магнитная проницаемость экрана.

Решение (2) записывается в виде суммы функций Ганкеля нулевого порядка (благодаря одномерности поля). Таким образом, в [4 с. 215-224], (при нахождении напряженности магнитного поля на внутренней поверхности экрана из закона полного тока), были получены выражения для потерь активной мощности в экране, потребления реактивной мощности, коэффициента мощности экрана как потребителя.

$$P = a_p \zeta P_0, \quad (3)$$

где  $P$  – потери активной мощности,  $a_p = 1,4$  – коэффициент, в соответствии с методом Неймана учитывающий нелинейность магнитной проницаемости,  $\zeta$  – коэффициент, учитывающий толщину экрана, оцениваемый по кривым [4, ст. 184].

$$\zeta = \frac{sh(kd) - \sin(kd)}{ch(kd) + \cos(kd)}, \quad (4)$$

где  $d$  – толщина экрана,

$$k = \sqrt{\frac{\omega\mu\gamma}{2}}. \quad (5)$$

Для стальных экранов при больших магнитных полях, то есть для случая когда напряженность поля больше величины, которая соответствует максимальной магнитной проницаемости, как следствие того, что электромагнитная волна затухает несколько быстрее, чем при слабых полях, при определении коэффициента  $\zeta$  учитывается не фактическая толщина экрана, а расчетная, равная  $1,4d$  [4].

$$P_0 = \pi D_0 l \left( 1 + \frac{D_0}{D_1} \right) \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\gamma}} \frac{H_{0m}^2}{2}, \quad (6)$$

где  $D_0$  – внутренний диаметр экрана,  $D_1$  – внешний диаметр экрана,  $l$  – длина экрана,  $H_{0m}$  определяется из закона полного тока:

$$H_{0m} = \frac{\sqrt{2}I}{2\pi r}, \quad (7)$$

где  $r$  – внутренний радиус экрана.

Для потребления реактивной мощности имеем:

$$Q = a_q \psi P_0, \quad (8)$$

где  $a_q = 0,85$ ,  $\psi$  – коэффициент, учитывающий толщину экрана, оцениваемый по данным [4, ст. 184].

$$\psi = \frac{sh(kd) + \sin(kd)}{ch(kd) + \cos(kd)}. \quad (9)$$

Относительно учета более быстрого затухания электромагнитной волны при сильных полях и выбора расчетной толщины экрана при определении коэффициента  $\psi$  справедливы те же замечания что и для формулы (4).

Для потребления кажущейся мощности:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (10)$$

Коэффициент мощности экрана как потребителя определяется из:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (11)$$

На рис. 1-3 приведены рассчитанные по формулам (4) – (10) энергетические характеристики экрана при различных токах в жиле. Расчеты приведены для магнитного экрана длиной 1 м, при оценивании магнитных проницаемостей экрана по кривым, приведенным в [4, ст. 61] и удельной электропроводности материала экрана  $\gamma = 10^6$  (См/м)  $D_0, D_1$  соответственно принимались равными 11 см и 11.3 см.

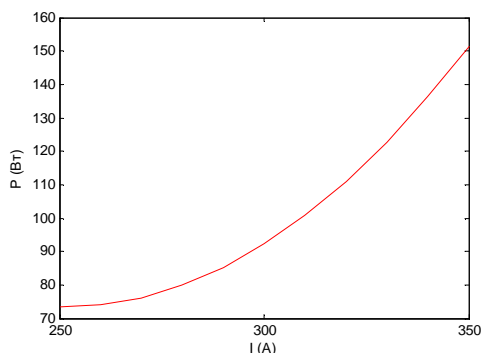


Рис. 1. Зависимость потерь активной мощности в магнитном экране от величины тока жилы

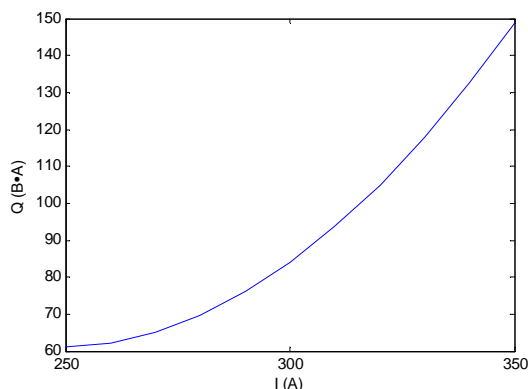


Рис. 2. Зависимость потребления реактивной мощности в магнитном экране от величины тока жилы

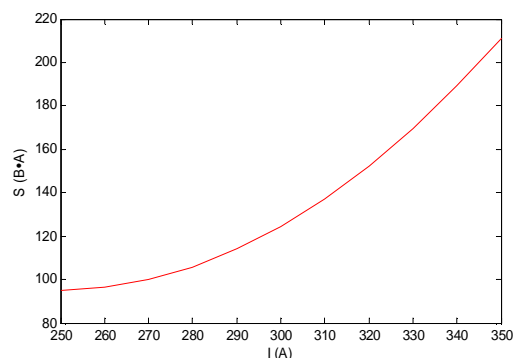


Рис. 3. Зависимость потребления кажущейся мощности в магнитном экране от величины тока жилы

Согласно проведенным расчетам, коэффициент мощности экрана как потребителя при токах 250 А, 300 А, 350 А составляет, соответственно, 0,77, 0,74, 0,71.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрены основные пути уменьшения полей рассеивания кабельных линий, среди которых важное место занимает электромагнитное и магнитное экранирование. Особо важна разработка таких путей для самого неблагоприятного, с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости, расположения фаз кабельной линии (в плоскости) и при соединении экранов с одной стороны, то есть при отсутствии продольных токов.

В большинстве случаев предлагаемые с целью уменьшения магнитных полей кабельных линий конструктивные изменения приводят к ухудшению теплового режима (в частности увеличение потерь обусловленных вихревыми токами) и, как следствие, к уменьшению пропускной способности кабельной линии. Как видно из представленных расчетов (рис. 1) проведенным по результатам, полученным в [4] с помощью волнового метода, указанные потери быстро растут с увеличением тока жилы, который в расчетах, кроме того, принимал не самое большое значение из возможных. В качестве одного из путей уменьшения указанных потерь может быть применение не сплошных, а проволочных магнитных экранов. Такое рассмотрение может иметь свое приложение и для учета потерь от вихревых токов в силовых кабелях типа МНСК. Также актуальным является сравнение эффективности применения магнитодиэлектриков между жилой и медным экраном, описанное в [6], с целью уменьшения потерь от продольных токов, с более распространенными путями подавления продольных токов, такими как применение транспозиции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ДСТУ ІЕС 60287-1-1:2009. Кабелі електричні. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1-1: Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коефіцієнт навантаження 100%) і обчислення втрат. Загальні положення.
2. ІЕС 287-1-1 Electric cables – Calculation of the current rating-Current rating equations (100% load factor) and calculations of losses Section 1 – General 1995.
3. Гура К.Ю. Особенности прокладки кабелей с изоляцией СПЭ в стальных трубах / К. Ю. Гура, Е.В. Остапенко // Электропанорама. – 2010. – № 49. – С. 33-36.

4. Туровский Я. Техническая электродинамика // Я. Туровский. – М.: Энергия, 1974. – 448 с.
5. Bascom E. C. Magnetic field management considerations for underground cable duct bank / E. C. Bascom, J. H. Cooper, W. Banker, R. Piteo, A. M. Regan, S. A. Boggs. // Transmission and distribution conference and exposition, 9 – 14 October 2005. Conference Publications. 2005. – P. 414-420.
6. Бардаков 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 докл. – Т.: 2011. – С. 209-211.
7. J.C.P. Lopez, P.C. Romero The effectiveness of compensated passive loops for mitigating underground power cable magnetic fields // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – Vol. 99, № 2. – P. 674-683.
8. D'Amore M. Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from power cable lines / M. D'Amore, E. Menghi, M.S. Sarto. // Electromagnetic compatibility 2003 IEEE international symposium, 18-22 August 2003. Conference publications. Vol. 1, 2003, P. 203-208.
9. D'Amore M. Design of new high-voltage "green" cables generating low magnetic field levels / M. D'Amore, F. M. Gatta, D. Paladino, M. S. Sarto // IEEE Power engineering society general meeting. 8 – 10 June 2004. Conference publications. Vol. 1. 2004, P. 457 – 462.
10. D'Amore New double-shielded power cables generating low magnetic field levels / M. D'Amore D. Paladino, M.S. Sarto // International symposium on electromagnetic compatibility. 8-12 August 2005. Conference publications. Vol. 1 2005, P. 179-184.
11. R. Conti, A. Giorgi, R. Rendina, L. Sartore, E.A. Sena Technical solutions to reduce 50 Hz magnetic fields from power lines // Proceedings of Power Tech Conference. 23-26 June 2003. Conference publications. Vol. 2. 6 p.
12. P. Sergeant, S. Koroglu. Electromagnetic losses in magnetic shields for buried high voltage cables // Progress in electromagnetic research. – 2011. – Vol. 115. – P. 441-460.
13. J.C. del Pino-Lopez, P. Cruz-Romero, L. Serrano-Iribarnegaray. Impact of electromagnetic losses in closed two-component magnetic shields on the ampacity of underground power cables // Progress in electromagnetic research. – 2013. – Vol. 135. – P. 601-625.
14. Резинкина М.М. Снижение уровня магнитного поля подземных токопроводов электромагнитными экранами, состоящими из U-образных элементов / М.М. Резинкина, В.С. Гринченко // Вісник НТУ "ХПІ". – 2012. – № 49. – С. 73-78.
15. Резинкина М. М. Экспериментальное исследование распределения магнитной индукции трехфазного токопровода при наличии электропроводящих пластин / М.М. Резинкина, В.С. Гринченко // Вісник НТУ "ХПІ". – № 49. – С. 75-81.
16. Туровский Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин // Я. Туровский. М.: Энергоатомиздат, 1982. – 200 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. DSTU IEC 60287-1-1:2009. Kabeli elektrichni. Obchislennya nominal'noї sili strumu. Chastina 1-1: Spivvidnoshennya dlya obchislennya nominal'noї sili strumu (koefficient navantazhennya 100%) i obchislennya vtrat. Zagal'ni polozhennya. 2. IEC 287-1-1 Electric cables - Calculation of the current rating-Current rating equations (100% load factor) and calculations of losses Section 1 - General 1995. 3. Gura K.Yu. Osobennosti prokladki kabelej s izolyacij SP'E v stal'nyh trubah / K. Yu. Gura, E.V. Ostapenko // `Elektropano

rama. - 2010. - № 49. - С. 33-36. 4. Turovskij Ya. Tehnicheskaya `elektrodinamika // Ya. Turovskij. - M.: `Energiya, 1974. - 448 s. 5. Bascom E. C. Magnetic field management considerations for underground cable duct bank / E. C. Bascom, J. H. Cooper, W. Banker, R. Piteo, A. M. Regan, S. A. Boggs. // Transmission and distribution conference and exposition, 9 - 14 October 2005. Conference Publications. 2005. - P. 414-420. 6. Bardakov O.A. Povyshenie peredavaemoj moschnosti kabelej s izolyacij iz sshitogo poli`etilena / O.A. Bardakov// `Energoberegayuschie tehnologii: mezhdunarodnaya molodezhnaya konferenciya, 28-30 iyunya 2011 g. materialy dokl. - T.: 2011. - S. 209-211. 7. J.C.P. Lopez, P.C. Romero The effectiveness of compensated passive loops for mitigating underground power cable magnetic fields // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2011. - Vol. 99, № 2. - P. 674-683. 8. D'Amore M. Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from power cable lines / M. D'Amore, E. Menghi, M.S. Sarto. // Electromagnetic compatibility 2003 IEEE international symposium, 18-22 August 2003. Conference publications. Vol. 1, 2003, P. 203-208. 9. D'Amore M. Design of new high-voltage "green" cables generating low magnetic field levels / M. D'Amore, F. M. Gatta, D. Paladino, M. S. Sarto // IEEE Power engineering society general meeting. 8 - 10 June 2004. Conference publications. Vol. 1. 2004, P. 457 - 462. 10. D'Amore New double-shielded power cables generating low magnetic field levels / M. D'Amore D. Paladino, M.S. Sarto // International symposium on electromagnetic compatibility. 8-12 August 2005. Conference publications. Vol. 1 2005, P. 179-184. 11. R. Conti, A. Giorgi, R. Rendina, L. Sartore, E.A. Sena Technical solutions to reduce 50 Hz magnetic fields from power lines // Proceedings of Power Tech Conference. 23-26 June 2003. Conference publications. Vol. 2. 6 p. 12. P. Sergeant, S. Koroglu. Electromagnetic losses in magnetic shields for buried high voltage cables // Progress in electromagnetic research. - 2011. - Vol. 115. - P. 441-460. 13. J.C. del Pino-Lopez, P. Cruz-Romero, L. Serrano-Iribarnegaray. Impact of electromagnetic losses in closed two-component magnetic shields on the ampacity of underground power cables // Progress in electromagnetic research. - 2013. - Vol. 135. - P. 601-625. 14. Rezinkina M.M. Snizhenie urovnya magnitnogo polya podzemnyh tokoprovodov `elektromagnitnymi `ekranami, sostoyaschimi iz U-obraznyh `elementov / M.M. Rezinkina, V.S. Grinchenko // Visnik NTU "HPI". - 2012. - № 49. - С. 73-78. 15. Rezinkina M. M. `Eksperimental'noe issledovanie raspredeleniya magnitnoj indukcii trehfaznogo tokoprovoda pri nalichii `elektroprovodyaschih plastin / M.M. Rezinkina, V.S. Grinchenko // Visnik NTU "HPI". - № 49. - С. 75-81. 16. Turovskij Ya. `Elektromagnitnye raschety `elementov `elektricheskikh mashin // Ya. Turovskij. M.: `Energoatomizdat, 1982. - 200 с.

*Поступила 03.06.2013*

*Костюков Иван Александрович, аспирант.  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра электроизоляционной и кабельной техники  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21  
e-mail: Kostiukow.Ivan@yandex.ru*

*Kostiukov I.A.  
General questions as to providing electromagnetic compatibility of power cable lines, their ampere capacity and types of shield construction.*

Works studying ways of reducing magnetic fields of cross-linked polyethylene power cable lines are reviewed. Different aspects of single-phase power cable shield construction influence on thermal conditions of a three-phase power cable line are analyzed. Questions concerning electromagnetic compatibility of power cables are considered.

*Key words – eddy current loss, circulating current, electromagnetic compatibility.*