

ЭЛЕКТРИК 5, 2018

Под внешней защитой подразумевается защита зданий и помещений, в которых размещена чувствительная и ответственная электронная аппаратура. В статье анализируются радиозащитные свойства традиционных строительных материалов, в частности, бетона и влияние различных факторов на его защитные свойства.

## Внешняя защита электронного оборудования энергосистем от электромагнитного импульса

Владимир Гуревич, г. Хайфа

Ниже будут рассмотрены композитные материалы с усиленными радиозащитными свойствами, показаны их слабые стороны, в частности, проблематичность применения в электроэнергетике в связи с наличием в помещениях большого количества кабелей, заходящих в защищаемое помещение из внешнего пространства и переизлучающих электромагнитный импульс внутри этого помещения. Рассматриваются радиопоглощающие строительные материалы, в частности, на основе пеностекла и ферритов. В качестве дополнительных мер рассматривается применение закрытых не перфорированных кабельных лотков внутри защищаемого помещения, а также архитектурные решения для такого помещения. Целью статьи является помощь потребителю в выборе оптимального варианта внешней защиты с учетом его материальных и технических возможностей.



щиты монтажных шкафов уже были рассмотрены нами ранее [1 – 3]. В данной статье рассматриваются проблемы обеспе-

### Введение

Электронное оборудование энергосистем: микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ), программируемые логические контроллеры (ПЛК), системы автоматики, телемеханика, связь и др. монтируется, как правило, в специальных монтажных шкафах и подключается к системе заземления; шкафы расположены в зале управления (релейный зал); этот зал в здании подстанции. Такой же «слоеной» должна быть и защита этого электронного оборудования от разрушительного воздействия электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ). Некоторые из этих «слоев», например, системы заземления электронной аппаратуры; ЭМИ фильтры, включаемых на входы такой аппаратуры; принципы и средства за-

Таблица 1

Материал	Вносимое затухание, дБ	
	500 МГц	1 ГГц
Бетон, толщиной: 102 мм 203 мм 305 мм	7 - 11 17 - 25 31 - 45	11- 14 22 - 28 33 - 45
Железобетон толщиной 203 мм: диаметр стержня 19 мм, шаг 70 мм диаметр стержня 19 мм, шаг 140 мм	26 23	30 27
Полые бетонные блоки, толщиной 203 мм 406 мм 609 мм	8 13 26	12 17 28
Сухие бревна, диаметром: 38 мм 76 мм 152 мм	2 1.5 4.5	3 3 6
Кирпичная кладка, толщиной 1 кирпич (89 мм) 2 кирпича (178 мм) 3 кирпича (267 мм)	0 3.5 4	3.5 5.5 7

**Таблица 2**

Вносимое затухание, дБ (раз) для частоты	200 МГц	500 МГц	1 ГГц
Влагосодержание, %			
0.2	3 (1.41)	4 (1.58)	4 (1.58)
5.5	11 (3.55)	18 (7.94)	20 (10)
12	18 (7.94)	32 (39.8)	35 (56.2)
Кратность изменения затухания для фиксированной частоты при изменении влагосодержания с 0.2% до 12%	5.6	25.2	8.75
Средняя кратность изменения вносимого затухания при изменении влагосодержания с 0.2% до 12%	13.2		

**Таблица 3**

Вносимое затухание, дБ (раз) для частоты	100 МГц	200 МГц	500 МГц	1 ГГц
Диаметр прутков арматуры, мм				
10	25 (17.8)	20 (10)	12 (3.98)	5 (1.78)
30	40 (100)	35 (56.2)	30 (31.6)	20 (10)
50	70 (316)	60 (1000)	55 (562)	45 (178)
Кратность изменения затухания для фиксированной частоты при изменении диаметра прутков от 10 до 30 мм	18	100	141	100
Средняя кратность изменения вносимого затухания при изменении диаметра прутков от 10 до 30 мм	90			

**Таблица 4**

Вносимое затухание, дБ (раз) для частоты	100 МГц	500 МГц	1 ГГц
Толщина бетона, мм			
600	60 (1000)	25 (17.8)	15 (5.62)
1000	60 (1000)	30 (31.6)	22 (12.6)
1500	60 (1000)	40 (100)	30 (31.6)
Кратность изменения затухания для фиксированной частоты при изменении толщины бетона с 600 до 1500 мм	1	5.6	5.6
Средняя кратность изменения вносимого затухания при изменении толщины бетона с 600 до 1500 мм	4		

**Таблица 5**

Вносимое затухание, дБ (раз) для частоты	100 МГц	500 МГц	1 ГГц
для одного слоя арматуры	70 (3160)	55 (562)	40 (100)
для двух слоев арматуры	110 (316000)	65 (1780)	42 (126)
Кратность изменения затухания для фиксированной частоты при переходе от одного слоя арматуры – к двум слоям	100	3.2	1.26
Средняя кратность изменения вносимого затухания при переходе от одного слоя арматуры – к двум слоям	35		

**Таблица 6**

Вносимое затухание, дБ (раз) для частоты	100 МГц	500 МГц	1 ГГц
Расстояние между двумя слоями арматуры, мм			
30	20 (10)	27 (22.4)	45 (178)
100	25 (178)	40 (100)	58 (251)
200	25 (178)	40 (100)	65 (1780)
Кратность изменения затухания для фиксированной частоты при изменении расстояния между двумя слоями арматуры от 30 до 200 мм	17.8	4.5	10
Средняя кратность изменения вносимого затухания при изменении расстояния между двумя слоями арматуры от 30 до 200 мм	10.8		

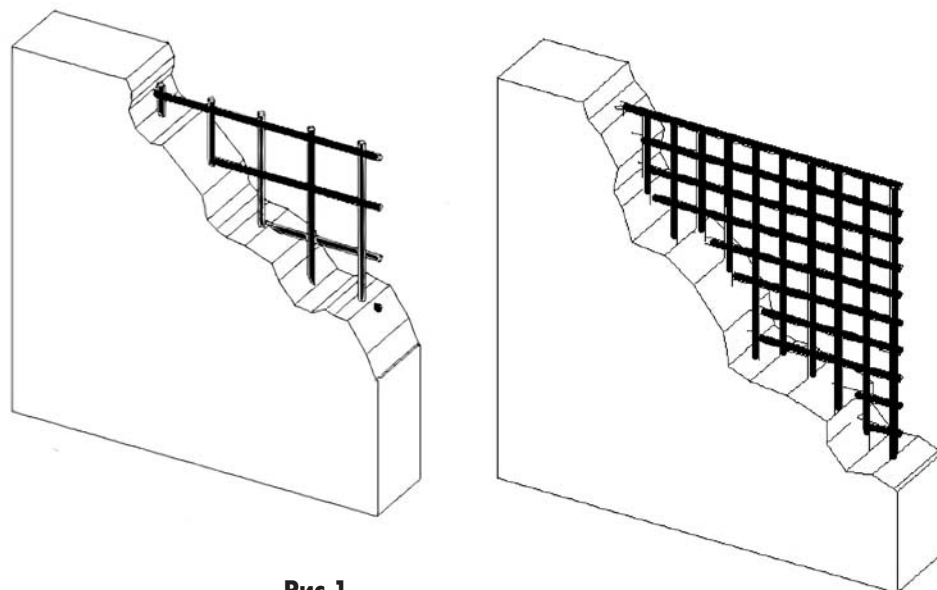
чения защиты здания подстанции и зала управления, которые определяются в статье как «внешняя защита».

Почему в дополнение к этим рассмотренным ранее «слоям» требуется еще один «слой» — внешняя защита? Обусловлено это несколькими причинами.

*Во-первых*, обеспечить высокую эффективность защиты от ЭМИ ЯВ только с помощью одного какого-то «слоя» бывает очень сложно, а часто и вообще невозможно, поскольку ЭМИ ЯВ — это и электрическое поле в воздухе с очень высокой напряженностью (до 50 кВ/м у поверхности земли), и импульс высокого напряжения, прикладываемый непосред-

электромагнитное излучение были проведены в 1990-х годах американским Национальным институтом стандартов и технологий в 1997 г. был выпущен полный отчет с результатами испытаний [4]. К сожалению, частотный диапазон, используемый в испытаниях, далеко не полностью охватывает реальный диапазон частот ЭМИ ЯВ (100 кГц — 1 ГГц), однако полученные данные (**табл.1**) вполне достаточны для общей оценки ситуации.

На **рис.1** показан железобетон с различной арматурой. Вносимое затухание для образцов бетона с различным влажосодержанием приведено в **табл.2**.



**Рис.1**

ственно ко входам электронной аппаратуры, и мощные наводки на системе заземления, проникающие прямо на чувствительные электронные элементы и др.

*Во-вторых*, отдельно взятые электронные устройства, например, МУРЗ или ПЛК не являются изолированными на электроэнергетическом объекте (например, на подстанции или электростанции), а соединены со множеством других устройств, часто расположенных на большом расстоянии друг от друга. Обеспечение высокоэффективной защиты каждого отдельно взятого электронного устройства в такой ситуации может оказаться слишком дорогим для практической реализации, по сравнению с «внешней защитой» целого зала или даже здания за счет использования специальных строительных материалов.

Целью данной статьи является рассмотрение существующих возможностей по защите от ЭМИ ЯВ целых зданий или залов и оценка эффективности такой защиты.

#### **Анализ способности традиционных строительных материалов ослаблять электромагнитное излучение**

Практически значимые экспериментальные исследования способности различных строительных материалов ослаблять

Вносимое затухание для железобетона с шагом сетки 100 мм и прутками арматуры различного диаметра приведено в **табл.3**. Вносимое затухание для железобетона различной толщины с шагом сетки 100 мм и прутками арматуры диаметром 20 мм приведено в **табл.4**.

Вполне ожидаемо, наилучшими результатами обладает армированный железобетон, хотя усиление его экранирующей способности по сравнению с обычным (не армированным) бетоном не так уж и велико, как можно было бы предполагать (напомним, что 20 дБ соответствует ослабле-

нию амплитуды излучения в 10 раз). Очевидно, что изменение параметров, как самого бетона, так и его арматуры, **рис.1**, может сильно повлиять на экранирующие свойства здания. Каким образом? Ответ на этот вопрос дают результаты многочисленных исследований [5-8].

В **табл.2 – табл.7** приведены некоторые обобщенные данные, отражающие влияние изменения различных параметров наиболее распространенного строительного материала на его экранирующие свойства.

Вносимое затухание для железобетона толщиной 1000 мм с влажосодержанием 12% с одним и двумя слоями арматуры с шагом сетки 100 мм и прутками арматуры диаметром 20 мм приведено в **табл.5**.

Вносимое затухание для усиленного железобетона с различным расстоянием между двумя слоями арматуры с шагом сетки 100 мм и прутками диаметром 20 мм приведено в **табл.6**.

Представленные в **табл.1 – табл.6** результаты могут быть использованы для анализа и оценки степени влияния того или иного параметра бетона на эффективность экранирования и выбора наиболее подходящих, для конкретных условий, средств повышения эффективности экранирования.

**Таблица 7**

Частотный диапазон, МГц	3 - 30	30 - 300	300 - 1200
Вносимое затухание, дБ	6 - 10	8 - 14	12 - 16



Сравнение результатов экспериментальных исследований, представленных различными авторами показало достаточно хорошее совпадение (расхождение не превышает 15%). Вместе с тем, необходимо понимать, что данные, полученные экспериментальным путем, соответствуют лишь конкретному материалу, находящемуся в конкретных условиях. Реальные материалы и реальные условия эксплуатации этих материалов могут очень существенно отличаться от используемых в эксперименте, что влечет за собой существенное изменение эффективности экранирования. Причем, эти изменения могут появляться и медленно изменяться даже для одного и того же материала с течением времени, что связано, например, с естественным постепенным уменьшением влагосодержания нового бетона, которое довольно существенно влияет на эффективность экранирования (табл.2).

### Композитные строительные материалы с повышенной электропроводностью

Композитные материалы с повышенной электропроводностью, специально предназначенные для электромагнитного экранирования, были впервые разработаны и исследованы еще в 1970-х годах (т.е. около 50 лет тому назад) [6, 7]. За про-



Рис.2

шедшее с тех пор время появилось много новых композитных строительных материалов, в основном, на основе бетона с различными добавками, повышающими его электропроводность и, следовательно, экранирующую способность. Такие материалы разработаны в Китае, Индии, США, России и многих других странах, а результаты их тестирования представлены в многочисленных публикациях, например, в [8 и др.].

В качестве добавок в бетон используются электропроводная пудра, в основном, угольная, графитовая и металлическая, угольные нити, углеродные нанотрубки, коротко нарезанные кусочки стальной проволоки. Рецептуры таких композитных строительных материалов запатентованы во многих странах (патенты США: 2868659, 3207705, 5346547, 5422174, 6214454, 6503318, 6821336, 7578881, 8067084, 8617309, 8968461, 9278887 и др; патенты России: 2545585, 2345968, 2234175, 2405749, 2291130 и др.; патенты Китая: 1282713, 1293012, 1298663, 1844025, 101030454, 1313410, 103979853, и др.)

Массовая доля графитоугольной смеси может достигать до 25 – 35%, а в некоторых рецептурах даже до 75% от общего веса материала. Понятно, что такая большая доля графит-

та и углерода в бетонной смеси, во-первых, обуславливает довольно высокую стоимость конечного продукта, а во-вторых, заметно снижает его механическую прочность.

В России в качестве электропроводного наполнителя для строительных материалов в последние годы стало модным использование шунгита. Шунгит – это природный минеральный композит, состоящий из высокодисперсных кристаллических силикатных частиц в аморфной углеродной матрице, рис.2.

Добывают шунгит в Зажогинском месторождении (Республика Карелия). Строительные материалы на основе магнезиально-шунгитовых смесей производятся в России компанией «Альфапол» (патент России № 2233255). В качестве строительных материалов используют шунгитовую породу группы III, представляющую собой природный композит, состоящей из 26-30% углерода и 56-60% силикатных частиц. Являясь строительным материалом, шунгитовые смеси наносятся на поверхности экранируемого помещения как отделочный материал. Для повышения эффективности экранирования возможно использование многослойного экранирования, путем сочетания штукатурного состава с металлической сеткой. По утверждению разработчиков, стоимость штукатурных шунгитовых смесей соизмерима со стоимостью обычных строительных материалов.

### Литература:

1. Гуревич В. И. Проблемы заземления электронной аппаратуры электроэнергетических объектов. // Компоненты и технологии. – 2017. - №4. –С.106 – 111.
2. Гуревич В. И. Применение LC-фильтров для защиты оборудования от электромагнитного импульса: реальная необходимость или инерция мышления? – Компоненты и технологии, 2017, № 7, с. 44 – 47.
3. Гуревич В. И. Принципы повышения устойчивости электронной аппаратуры на объектах электроэнергетики к ЭМИ ЯВ. – Автоматизация и ИТ в электроэнергетике, 2018, № 3.
4. NISTIR 6055. Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials, NIST Construction Automation Program, Report No. 3, National Institute of Standards and Technology, 1997.
5. Hyun S.Y., Du J.K., Lee H.J., Lee K. W., et al, Analysis of Shielding Effectiveness of Reinforced Concrete Against High-Altitude Electromagnetic Pulse. – IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, Vol. 56, No. 6, pp. 1488 – 1496.
6. Allen L., Walker W. F., Siarkiewicz K. R. An Investigation of the Electromagnetic Properties of Advanced Composite Materials. - International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE-1976, pp. 174—179.
7. Casey K. F. Electromagnetic Shielding by Advanced Composite Materials. - Final report AFWL-PD-76-I74 prepared by Kansas State University for Air Force Weapons Laboratory, Kirtland Air Force Base, New Mexico, 1997, 144 p.
8. Chiou J.-M., Zheng Q., Chung D. D. L. Electromagnetic Interference Shielding by Carbon Fiber Reinforced Cement. - Composites, 1989, Vol. 20, No. 4, pp. 379-380.

(Продолжение следует)