

СНИЖЕНИЕ ПРОБОЙНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ НАХОЖДЕНИИ В РАЗРЯДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ЗАРЯЖЕННЫХ МИКРОЧАСТИЦ

к.т.н. А.Н. Панченко, А.С. Рогозин, к.т.н. В.Г. Рыкун

Рассматриваются процессы, протекающие при нахождении в разрядных промежутках заряженных микрочастиц. Приводятся аналитические выражения, позволяющие оценить снижение пробойной напряженности электрического поля при взаимодействии заряженных частиц с поверхностью электроустановок.

Постановка проблемы. В связи с применением в вооруженных конфликтах конца XX века и начала XXI веков средств, способных инициировать короткие замыкания элементов энергосистем, возникает необходимость исследования процессов, протекающих в разрядных промежутках при взаимодействии заряженных микрочастиц с поверхностью электроустановок, входящих в энергосистему.

Анализ литературы. В работе [2] рассматривалось влияние заряженных микрочастиц, находящихся в разрядном промежутке, на пробивную напряженность электрического поля. В этих работах показано, что внесение в разрядный промежуток заряженных частиц существенно снижает прочность изоляции разрядных промежутков, описывается механизм заряжения микрочастиц, приводятся экспериментальные данные по снижению пробивного напряжения, так по данным работы [2] порошок из металлических частиц размером 5 – 40 мкм снижал пробивное напряжение от 65 до 7 – 9 кВ. Снижение пробивного напряжения в этих работах исследовалось применительно к вакуумной технике. Вопрос о влиянии заряженных частиц на пробивную напряженность электрического поля в воздушной среде не рассматривался.

Цель статьи. Выяснение влияния заряженных микрочастиц на прочность воздушной изоляции элементов электроустановок с высоким рабочим напряжением.

При передаче и распределении электрической энергии с использованием в качестве изоляции воздуха, наиболее вероятными местами возникновения пробоя изоляционных промежутков являются участки, на

которых напряженность электрического поля имеет наибольшее значение. Максимальные значения напряженности электрического поля отмечаются между проводом и поверхностью земли, на участках максимального прогиба провода, а также между проводом и опорой. При проектировании линий электропередачи изолирующие промежутки и гирлянды изоляторов выбираются с учетом возможного перенапряжения и погодных условий, при этом не учитывается возможность снижения пробивного напряжения за счет взаимодействия заряженных микрочастиц с токоведущими частями и изолирующими конструкциями. В связи с вышеизложенным, возникает необходимость исследования влияния заряженных микрочастиц на прочность воздушной изоляции линий электропередачи, в местах наиболее вероятного возникновения электрического пробоя.

Для выяснения физических процессов, протекающих при приближении заряженных частиц к элементам линии электропередачи, необходимо, прежде всего, знать напряженность электрического поля в зазоре между заряженной частицей и поверхностью токоведущих частей и изоляционных конструкций. В случае, когда размер заряженных частиц намного меньше размеров изоляторов и проводников, используемых для передачи электрической энергии, то частицу и поверхность, если расстояние между ними не превышает размер частицы, можно рассматривать как систему электродов шар-плоскость.

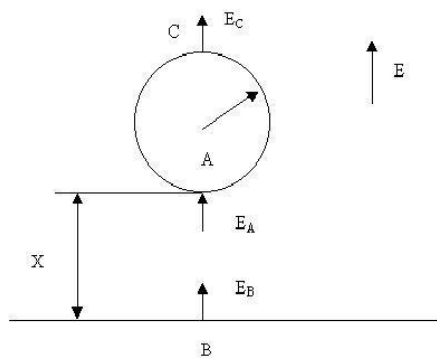


Рис. 1. Схема системы электродов шар-плоскость

В работе [3] приведен математический аппарат расчета напряженности электрического поля, для электродов шар-плоскость, для точек с максимальной напряженностью поля A, B, C рис. 1. Выражение напряженности электрического поля для точек A, B, C имеет вид

$$E = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \phi + E\psi, \quad (1)$$

где q – заряд частицы; E – напряженность электрического поля, создаваемая поверхностью; ϕ , ψ –

коэффициенты усиления электрического поля частицы и плоскости соответственно. При относительном расстоянии X/R меньше 0.7 поле между шаром и плоскостью становится близким к однородному и соответственно может быть определено, как значение напряженности электрического

поля в точке А. На рис. 2 изображена зависимость коэффициентов φ , ψ для точки А от относительного расстояния X/R . Из зависимости, показанной на рис. 2, следует, что увеличение поля более чем на порядок, как за счет внешнего поля (ψ), так и вследствие собственного заряда частицы (φ), наступает при относительных расстояниях, меньших 0.1, а при относительных расстояниях, приблизительно 0.004, поле увеличивается более чем на два порядка.

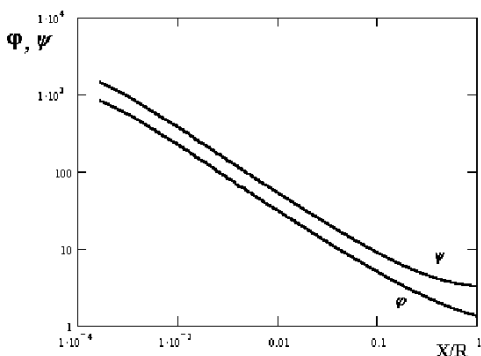


Рис. 2. Зависимость коэффициентов усиления электрического поля для точки А от относительного расстояния

Напряженность поля плоскости при приближении заряженной частицы к токоведущим частям можно считать равной напряженности электрического поля, создаваемого цилиндрическим проводником бесконечной длины. В случае, если в качестве плоскости выступает поверхность изолятора, то напряженность поля, создаваемую изолятором, можно определить, зная падение напряжения на данном участке изолирующей конструкции. Относительное падение напряжения на гирлянде изоляторов согласно [4] имеет вид

$$\frac{U_K}{U_\Gamma} = \frac{1}{(C_3 + C_\Pi) \cdot \text{sh} a n_\Pi} \cdot [C_3(\text{sh} a k - \text{sh} a(k-1)) - C_\Pi(\text{sh} a(n_\Pi - k) - \text{sh} a(n_\Pi - k + 1))], \quad (2)$$

где $a = \sqrt{\frac{C_3 + C_\Pi}{C_\Pi}}$; C_Π – собственные емкости изоляторов; C_3 – частичная емкость сцепной арматуры изолятора на землю; C_Π – частичная емкость сцепной арматуры изолятора (шапка и пестик смежных изоляторов) на провод; U_K – падение напряжения на изоляторе со строительной высотой H_Π на расстоянии $(k-1)H_\Pi$ от заземленного конца изолятора; U_Γ – напряжение на гирлянде изоляторов. Для реальных гирлянд воздушных линий $C_\Pi = (50 - 70)$ пФ, $C_3 = (4 - 5)$ пФ; при одиночных проводах $C_\Pi = (0,5 - 1)$ пФ и при расщепленных проводах $C_\Pi = (2 - 3)$ пФ; n_Π – число изоляторов в гирлянде; k – порядковый номер изолятора от заземленного края гирлянды. На рис. 3 представлено распределение относительного напряжения вдоль поддерживающей гирлянды изоляторов ли-

нии класса 500 кВ, состоящей из двадцати двух изоляторов.

При приближении заряженных частиц к токоведущим частям электроустановок и достижении между ними напряженности электрического поля,

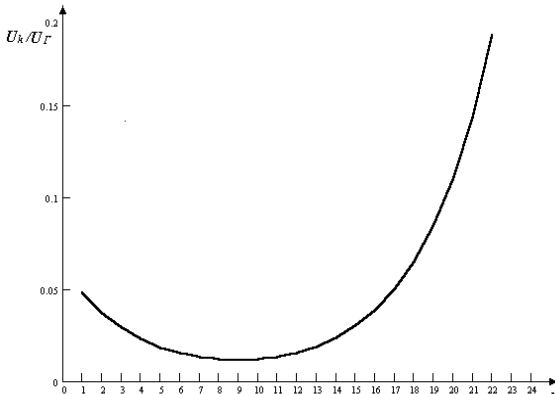


Рис. 3. Распределение относительного напряжения вдоль поддерживающей гирлянды изоляторов

достаточной для пробоя воздушного промежутка, между частицей и элементами электроустановки возможен электрический разряд. Для возникновения разряда необходимо, чтобы помимо достижения пробивной напряженности поля в промежутке на некотором расстоянии, выполнялись бы два условия. Суммарное время задержки и формирования разряда

должно быть меньше времени, за которое частица может совершить перемещение, в результате которого пробой станет невозможен. Длина свободного пробега электронов и ионов должна быть намного меньше расстояния, на котором достигается пробивная напряженность поля. Время формирования разряда на расстояниях, меньших 100 мкм, не превышает 10^{-9} сек. Скорости частиц, с размерами, большими нескольких микрон, не превышают 100 м/сек,

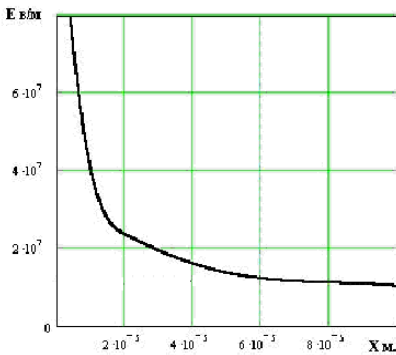


Рис. 4. Зависимость пробивной напряженности поля от расстояния

когда они проходят разность потенциалов 100 кВ. За время 10^{-9} сек они пройдут расстояние 0,1 мкм, соизмеримое с высотой выступов на поверхности, поэтому временем формирования разряда можно пренебречь. Длина свободного пробега электронов в воздушной среде при нормальных условиях составляет (0,1 – 0,01) мкм, и для развития разряда требуется промежуток $\approx 0,5$ мкм [3]. На рис. 4 представлена зависимость величины пробивной напряженности электрического поля для воздуха от расстояния при нормальных условиях, построенная по экспериментальным

данным, приведенным в [5], для электродов сфера-плоскость. Зависимость, показанная на рис. 3 в аналитическом виде, имеет вид

$$E_{\text{пр}}(x) = 4922,1 \cdot x^{-0,64}. \quad (3)$$

Зная пробивную напряженность электрического поля для воздуха и выражение для напряженности поля в точке А, можно определить расстояния, на которых достигается пробивная напряженность поля для разных размеров частиц. Условие для разряда частицы можно записать в виде

$$E(\varphi, \Psi) = E_{\text{пр}}(x), \quad (4)$$

где $E(\varphi, \Psi)$ – напряженность поля между заряженной частицей и плоскостью; $E_{\text{пр}}(x)$ – пробивная напряженность электрического поля воздушно-го промежутка.

На рис. 5 представлены зависимости расстояний, на которых достигается пробивная напряженность поля для разных размеров частиц от напряженности поля, создаваемого плоскостью. При построении зависимостей полагалось, что заряды микрочастицами приобретены посредством распыления [6]. При пробое воздушных промежутков, не превышающих 0.5 см, разряд протекает согласно теории пробоя Таунсенда, по которой пробой происходит за счет лавинного увеличения свободных носителей заряда, инициируемого электронами, образованными у поверхности частицы.

Для качественной оценки образования возле поверхности изоляторов ионизированного слоя воздуха, необходимо знать характер изменения в разрядном промежутке свободных носителей заряда. При возникновении возле поверхности заряженной частицы свободного электрона, и если за промежуток времени между столкновениями с атомами электрон приобретает энергию, достаточную для ионизации воздуха, первичный электрон создает электронную лавину. Нарастание числа носителей заряда в лавине в однородном поле описывается уравнением

$$n = n_0 e^{\alpha x}, \quad (5)$$

где n_0 – количество первичных электронов; α – коэффициент ударной ионизации; x – расстояние, пройденное первичными электронами. Величина коэффициента α зависит от напряженности электрического поля и

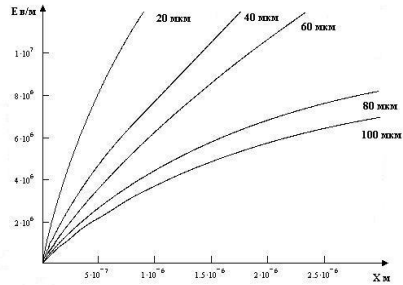


Рис. 5. Зависимость пробивных расстояний от напряженности электрического поля

плотности газа. При разряде между заряженной микрочастицей и плоскостью радиус ионизированной области можно определить на основе диффузионных процессов и он равен [7]:

$$r = \left(\frac{9}{2} \frac{U_x}{E} \right)^{0.5}, \quad (6)$$

где x (см) – расстояние, пройденное лавиной в поле E (в/см); U – тепловая энергия электронов, для нормальных условий равна 1,5 эВ [8].

Концентрация положительных ионов и электронов в канале разряда примерно одинакова и имеет порядок 10^{13} см^{-3} [1]. Если принять допущение, что концентрация положительных ионов и электронов постоянна на всей протяженности канала разряда, то общее количество электронов в канале разряда будет равно

$$N \approx \frac{9 \cdot 10^{13} \pi U_x^2}{8 E_{\text{пр}}}. \quad (7)$$

Подставляя (3) в выражение определения количества электронов в газоразрядной плазме, получим выражение для определения количества электронов в канале при электрическом разряде между частицей и плоскостью

$$N \approx \frac{9 \cdot 10^{13} \cdot \pi U_x^2}{8 \cdot 4922,1 x^{-0,64}} = 1,08 \cdot 10^{10} \cdot x^{2,64}. \quad (8)$$

После прохождения тока разряда через образованный ионизированный канал в силу различия в подвижности ионов и электронов последние под воздействием внешнего поля покинут разрядный канал. В случае, если напряженность электрического поля достаточна для придания электронам энергии, равной энергии ионизации молекул газа, то покинувшие канал электроны образуют согласно (5) лавину. Для рассматриваемого случая, пренебрегая рекомбинацией и образованием отрицательных ионов и считая, что все электроны, покинувшие канал разряда, участвуют в образовании лавины, уравнение нарастания числа носителей заряда в лавине в однородном поле запишем в виде

$$n = 1,08 \cdot 10^{10} \cdot x^{2,64} e^{\alpha l}, \quad (9)$$

где l – расстояние, пройденное электронами в направлении электрического поля; x – расстояние, на котором произошел разряд между частицей и плоскостью.

Электронная лавина переходит в стример, если поле, образованное положительными ионами в головке лавины, достигает величины порядка внешнего поля E . Согласно [7] для лавин в воздухе можно использовать следующее выражение определения напряженности электрического поля, созданного положительными ионами в головке лавины

$$E_R = 5,27 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{n_0 \cdot \alpha \cdot e^{\alpha l}}{(1/p)^{1/2}}, \quad (10)$$

где n_0 – начальное количество электронов, образующие лавину; p – давление мм. рт. ст.; l – расстояние, пройденное лавиной; α – коэффициент ударной ионизации.

Подставляя в (10) начальное количество электронов, образующее лавину, из (8) получим выражение для определения напряженности поля, образованного положительными ионами в головке лавины при инициировании лавины электронами, образованными при разряде заряженной частицы

$$E_R = 5,27 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1,08 \cdot 10^{10} \cdot x^{2,64} \cdot \alpha \cdot e^{\alpha l}}{(1/p)^{1/2}}. \quad (11)$$

Принимая в качестве условия возникновения стримера соотношение $E_R = KE$, (12)

где $K \approx 0,1$ [7], можно рассчитать минимальное пробивное напряжение промежутка длиной l см в воздухе при давлении p с учетом образования электронов при разряде микрочастиц [7].

Расчет минимального пробивного напряжения промежутка l см по Мику сводится к выбору произвольного значения E , соответствующего этой напряженности поля, коэффициент α подставляется в выражение (11). Если получившаяся при этом величина E_R меньше E , то необходимо увеличить исходную величину E . Такая операция повторяется до тех пор, пока не будет выполняться условие (12).

Выводы. 1. При приближении заряженных микрочастиц к поверхности изолирующих конструкций линий электропередачи, между микрочастицами и поверхностью происходит электрический разряд. Расстояние, на котором происходит разряд, зависит от заряда и размера микрочастиц, а также от напряженности электрического поля, создаваемой поверхностью.

2. Разряд для частиц, имеющих диаметр менее 20 мкм, маловероятен в виду того, что расстояние, на котором достигается пробивная напряженность электрического поля, не достаточно для формирования электронной лавины.

3. Снижение пробивного напряжения происходит за счет увеличения числа начальных электронов, инициирующих электронную лавину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кизеветтер В.Е. *Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции.* – Л.: Энергия, 1969. – 239 с.
2. Розанова Н.Б. *Изв. АН СССР. Сер. Физ., 1962, № 26.* – С. 1438 – 1445.
3. Мартынов Е.П. *Электронная техника. Вып. 3.* – М.: Наука, 1973. – С. 3 – 13.

4. Александров Г.Н. Сверхвысокие напряжения. – Л.: Энергия, 1973. – 175 с.
5. Сканапи Г.И. Физика диэлектриков. – М., 1958. – 470 с.
6. Панченко А.М., Рогозин А.С. Распыление мелко дисперсионных масс в газовой среде // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ. – 2003. – Вып. 6(22). – С. 67 – 76.
7. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. – М.: Изд. иностранной литературы, 1960. – 614 с.
8. Ретер Г. Электронные лавины и пробой в газах. – М.: Мир, 1968. – 390 с.

Поступила 8.08.2003

ПАНЧЕНКО Анатолий Николаевич, канд. техн. наук, нач. кафедры ХВУ. В 1978 году окончил ХВВКИУ РВ. Область научных интересов – энергетика.

РОГОЗИН Анатолий Сергеевич, адъюнкт ХВУ. В 1995 году окончил ХВУ. Область научных интересов – энергетика.

РЫКУН Владимир Георгиевич, канд. техн. наук, доцент кафедры ХВУ. В 1985 году окончил ХВВКИУ РВ. Область научных интересов – энергетика.

УДК 621.371

ВЫБОР МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ПО КРИТЕРИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ АПРИОРНЫХ ДАННЫХ О ПРОТИВОБОРСТВУЮЩЕЙ СТОРОНЕ

к.т.н. С.В. Арепьев

(представил д.т.н., проф. В.И. Долгов)

Предложен подход к решению задачи выбора метода защиты информации по критерию эффективности при условии наличия априорных данных о противоборствующей стороне.

Постановка проблемы. На современном этапе развития мировой цивилизации наблюдается устойчивая тенденция к увеличению использования технических средств негласного доступа к информации (ТСНДИ) с целью добывания сведений конфиденциального характера во многих областях жизни и деятельности общества. При этом происходит бурное развитие ТСНДИ, при разработке которых используются новейшие достижения в различных областях науки и техники. Параллельно с развитием ТСНДИ, совершенствуются и методы негласного доступа к информации (МНДИ).

Анализ современного состояния вопроса организации технической за-

щиты информации (ТЗИ) показывает, что существующие рекомендации по ТЗИ являются недостаточно гибкими и не всегда учитывают не только реальные условия обстановки, но и реальные возможности противоборствующих сторон. Такое положение дел, зачастую, приводит к тому, что эффективность мероприятий по организации ТЗИ снижается, а ресурсно-временные затраты на проведение данных мероприятий увеличиваются.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что разработка рекомендаций по организации эффективной защиты информации является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит специалистам оптимизировать процесс принятия решения по выбору методов и средств ТЗИ.

Анализ литературы. В работе [1] предложен подход к решению задачи выбора методов ТЗИ по критерию эффективности, который позволяет достичь наибольшего гарантированного результата в условиях отсутствия априорных данных о противоборствующей стороне (причем сама противоборствующая сторона может быть неопределена) и при условии отсутствия ресурсно-временных ограничений со своей стороны. Однако данная ситуация является наиболее общим случаем, при котором лицу, занимающемуся организацией ТЗИ, приходится принимать решение.

Цель статьи. Данная работа является продолжением цикла статей, целью которых является описание предложенных автором подходов к решению задачи повышения эффективности мероприятий по организации технической защиты информации в конкретных условиях обстановки.

Рассмотрим частный случай, когда противоборствующая сторона (ПС) определена и имеются достоверные сведения об ее ресурсно-временных возможностях. В данной ситуации становится очевидным, что подход, описанный в [1], может потерять свойство оптимальности. Это объясняется тем, что данный подход максимизирует уровень защиты информации даже в тех случаях, когда в этом нет необходимости и соответственно, приводит к неоправданным ресурсно-временным затратам на организацию ТЗИ. Рассмотрим данный случай более подробно. Допустим, что лицу, занимающемуся организацией защиты информации, известны следующие факторы:

- четко определена противоборствующая сторона;
- имеются достоверные сведения о наличии у ПС средств негласного доступа к информации (или финансовых возможностей на их приобретение);
- имеются достоверные сведения о наличии у ПС специалистов по применению имеющихся в наличии технических средств негласного доступа к информации (или о финансовых возможностях найма таких лиц);
- имеется информация о времени, необходимом ПС для приведения в боевой режим имеющихся в наличии средств негласного доступа к

информации.

Наличие данных факторов позволяет лицу, осуществляющему ТЗИ (ЛОТЗИ), определить следующее:

- наиболее вероятные каналы утечки информации при применении имеющихся в наличии у ПС средств негласного доступа к информации;
- время, необходимое ПС для организации негласного доступа к защищаемой информации;
- методы и средства защиты информации из множества возможных;
- ресурсно-временные затраты на организацию ТЗИ.

Наличие таких сведений позволит преступить к первому этапу защиты информации – организационным мероприятиям по ТЗИ [1]. Опыт показывает, что наиболее трудным для лица, занимающегося организацией ТЗИ, является выбор эффективных методов защиты информации с учетом конкретных условий обстановки. Очевидно, что для облегчения задачи выбора эффективных методов ТЗИ из множества возможных, ЛОТЗИ должно пользоваться определенными критериями выбора данных методов из множества возможных.

Задача выбора критерия эффективности предполагает, в первую очередь, выбор показателя эффективности, т.е. выбор меры степени соответствия реального результата требуемому [2]. По отношению к достигаемой степени защиты информации при описанных выше условиях будет справедливо утверждение, что может наступить только два события: событие А – негласный доступ к информации закрыт и событие В – негласный доступ к информации открыт. Тогда вероятность наступления события А зависит от применяемого метода защиты информации u из множества U возможных методов т.е. $u \in U$. Соответственно функцию соответствия ρ реального результата требуемому, при условии, что вероятность $P_u(A)$ наступления события А зависит от выбранного на основе использования априорной информации о ПС, метода защиты информации, можно определить как переменную, которая может принять лишь два значения, 0 или 1, т.е.

$$\rho(y(u), y^{TP}) = \begin{cases} 1, & y(u) \geq y^{TP}; \\ 0, & y(u) < y^{TP}, \end{cases} \quad (1)$$

где: y^{TP} – требуемый уровень защиты информации; $y(u)$ – уровень защиты информации, достигаемый при применении метода u .

Из выражения (1) следует, что достижение результата А есть непременное условие выполнения поставленной задачи. Тогда, согласно [2], в качестве показателя эффективности необходимо выбирать вероятностную гарантию выполнения поставленной задачи

$$W(u) = P(\bar{y}(u) \geq y^{TP}), \quad (2)$$

где символ \wedge означает случайную величину.

Выше было показано, что основной целью данной работы является выбор оптимального критерия эффективности ТЗИ при условии наличия априорных данных о ПС. Следовательно для выбора данного критерия необходимо использовать концепцию оптимизации [2], в рамках которой считается, что рациональными считаются те методы технической защиты информации $u \in U$, которые могут обеспечить максимальный эффект мероприятий по ТЗИ при заданных условиях, т.е.

$$W(u^*) = \max_{u \in U} W(u). \quad (3)$$

Анализ выражений (1 – 3), а также совокупности критериев, входящих в концепцию оптимизации, показал, что наиболее приемлемым для рассматриваемой задачи является критерий наибольшей вероятностной гарантии результата [2], согласно которому рекомендуется в качестве оптимального выбирать метод ТЗИ $u \in U$ из условия

$$u^* : \max_{u \in U} P(\hat{y}(u) \geq y^{TP}). \quad (4)$$

Вывод. Предложенный в данной работе подход к решению выбора методов защиты информации позволяет следующее:

– в случае выбора наиболее эффективного метода защиты информации для известного технического канала утечки информации в условиях наличия априорных данных о противоборствующей стороне, критерий наибольшей вероятностной гарантии результата является наиболее оптимальным;

– предложенный в данной работе подход к решению задачи выбора метода защиты информации в условиях наличия априорных данных о противоборствующей стороне позволяет избежать неоправданных ресурсно-временных затрат на организацию ТЗИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арепьев С.В., Можаяев А.А., Гирдвоин В.А. Выбор методов защиты информации по критерию эффективности // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2001. – Вып. 4(14). – С. 200 – 203.
2. Надежность и эффективность в технике. Справочник в десяти томах. Т. 3 / Под ред. В.Ф. Уткина. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.

Поступила 8.08.2003

АРЕПЬЕВ Сергей Викторович, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательской лаборатории научного центра при ХВУ. В 1993 году окончил Харьковское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск. Область научных интересов – техническая защита

та информации.