УДК 621.314.222.6.045.064

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

© 2011 Ю. П. Кубарьков, В. Г. Гольдштейн, Л. М. Инаходова

Самарский государственный технический университет

Рассматриваются основные положения стохастического моделирования в задачах, связанных с анализом электромагнитной совместимости (ЭМС) электрооборудования автономных электроустановок. Формулируются условия реализации решения задач ЭМС на основе уравнений Маркова и Колмогорова, а также построения фильтров, учитывающих физические процессы в электроустановках (ЭУ).

Электроснабжение, электротехнический комплекс, активно-адаптивная электрическая система, моделирование, режим работы, электромагнитная совместимость.

Системы электроснабжения электротехнических комплексов (ЭК) являются сложными активно-адаптивными электрическими системами (ААЭС), обладающими рядом специфических особенностей (многофункциональность, разнородность источников электроэнергии, разнообразие видов электрооборудования, избыточность, различные последствия отказов элементов, непостоянство нагрузки и т.п.). Эти особенности существенным образом влияют на выбор, разработку и адаптацию методов оценки надёжности ААЭС, подвергающихся в современных условиях интенсивным и жёстким внешним и внутренним эксплуатационным физическим воздействиям (ЭФВ).

Проблемы ЭМС устройств ААЭС с техносферой и с электроустановками (ЭУ) связаны как с названным потоком ЭФВ, так и с усилением их обратного влияния на питающую сеть. Это связано с непрерывным ростом запасов электромеханической и электромагнитной энергии в их элементах, катастрофическим увеличением изношенного оборудования, повышением требований ответственных потребителей к качеству электроэнергии и др.

Научное обоснование возникновения, развития и результатов ЭФВ в большом числе случаев производится с помощью методов статистического моделирования [1], поскольку ЭФВ, которые являются причинами выхода из строя электрооборудования (ЭО), являются случайными процессами.

Основное предназначение этих исследований состоит в том, чтобы, используя методы теории вероятностей и математической статистики, оценки технического состояния и технической диагностики, предотвратить аварийные ситуации, приводящие к значительным убыткам из-за неожиданного выхода из строя дорогостоящих ЭУ, а также ущербам от перерывов электроэнергии. Это является существенным фактором повышения надёжности работы обширного класса ЭУ – генераторно-двигательного и преобразовательного электрооборудования (ГДПЭО), а именно: силовых генераторов, двигателей и преобразователей, а также измерительных устройств – трансформаторов тока и напряжения, регламентом которых являются, главным образом, директивные и руководящие документы, указания, правила и стандарты.

Как показывают теоретические [2] и прикладные исследования [3, 4], при решении задач анализа ЭМС для ГДПЭО широкие перспективы представляют приложения теории случайных функций. К этим задачам можно отнести, например, статистическое определение времени работы ЭУ без нарушений ЭМС. Строго говоря, это не что иное, как нахождение вероятности пребывания совокупности диагностических признаков или одного из них (в определениях [4]) как ординаты случайной функции [2] в заданной области граничных значений [3, 4] в течение фиксированного времени.

Сюда же можно отнести и нахождение средних величин, характеризующих ЭВФВ, опасных для электрооборудования ААЭС. Их в математике определяют термином «выбросы». При этом определяется, например, среднее время выброса, среднее число выбросов на заданном интервале времени [2] (например, число опасных перенапряжений, приходящих на ЭУ в течение годового интервала [3, 4]) и др.

Как правило, эти задачи выходят за рамки возможностей классического математического анализа, корреляционной теории. Для их решения целесообразно использование допущения о том, что процессы, связанные с анализом ЭМС в условиях потока ЭФВ на объекты АЭС, можно считать Марковскими. Следует отметить, что несмотря на широкие возможности этого мощного математического аппарата, его применение к решению проблем ЭМС в электроэнергетике весьма ограничено.

Поэтому цель и мотивацию настоящей работы, в отличие от известных приложений [1-3], авторы формулируют как решение стохастической задачи анализа ЭМС по определению показателей ЭМС объектов ААЭС, опираясь на положения Марковского подхода.

Модель ЭУ, используемая при анализе ЭМС объекта ААЭС и, в частности, ГДПЭО, может быть классифицирована общепринятым термином «Марковская» [2], если оценка технического состояния ЭУ в будущие моменты времени выполняется на основе диагностической информации о ней в некоторый заданный момент времени при отсутствии или без учёта сведений о её предшествующих состояниях.

В соответствии с этим применительно к анализу ЭМС для объектов ГДПЭО определим случайный процесс U изменения некоторого диагностического признака состояния ЭУ в виде так называемых текущих ординат – его значений $U(t_j)\equiv u_j$ (j=1, 2,…, j,…, n-2, n-1, n) в дискретные возрастающие моменты времени $t_1<t_2\ldots<t_j\ldots<t_{n-2}<t_{n-1}<t_n$. Теперь с учётом Марковских свойств названной модели условная плотность вероятности p для ординаты процесса u_n имеет вид

$$p\,(u_n \mid u_1, u_2,\ldots, u_j,\ldots, u_{n-2}, u_{n-1}) = p\,(u_n \mid u_{n-1}).$$

Здесь отражена характерная особенность Марковского случайного процесса, которая заключается в том, что вся иерархия его многомерных законов распределения и, следовательно, все его свойства однозначно могут быть выражены с помощью формулы умножения вероятностей через двумерный закон распределения его ординат, то есть

$$p(u_n \mid u_1, u_2,\ldots, u_{n-1}) =$$
$$p(u_n \mid u_{n-1}) \cdot p(u_1, u_2,\ldots, u_{n-1}) =$$
$$p(u_n \mid u_{n-1}) \cdot p(u_{n-1} \mid u_{n-2}) \cdot\ldots\cdot p(u_n \mid u_{n-1}) \cdot f(u_1).$$

Считая изменения названного диагностического признака состояния ЭУ ЭС $U(t)$ Марковским случайным процессом, при дальнейшем построении математического описания для упрощения изложения ограничим множество $U(t_j)$ тремя ординатами этого процесса, определёнными в возрастающие моменты времени $t<t_П<\tau$. При этом будем использовать для них более удобную в дальнейших рассуждениях систему обозначений, соответственно, $U(t_j)\equiv x,y,z$.

Теперь вероятность того, что исследуемая ЭУ АЭС, находящаяся в момент времени t в состоянии x, окажется в момент времени τ в состоянии y, пройдя при этом в промежуточный момент времени $t_П$ состояние z, можно определить с помощью выражения, получившего название обобщённого уравнения Маркова [2]:

$$p(t,x,\tau,y)=\int_{-\infty}^{\infty} \begin{matrix} p\,(t,\,x,\,t_П\,,\,z)\times \\ \times p\,(t_П\,,\,z,\,\tau,\,y)\,dz \end{matrix}\,. \qquad (1)$$

Функция $p(t,x,\tau,y)$ является плотностью вероятности случайной величины U. Она по определению неотрицательна и, естественно, для неё $\int_{-\infty}^{\infty} p\,(t,\,x,\,\tau,\,y)\,dy=1$. В соответствии с определением Марковских процессов функция $p(t,x,\tau,y)$ подчиняется системе двух дифференциальных уравнений в частных производных, которые впервые были получены А.Н. Колмогоровым [2].

Кратко поясним, каким образом это было сделано. Обобщённое уравнение Маркова было использовано для получения приближённого выражения первой производной функции p по времени t через её производные по аргументу x. Центральным моментом здесь является определение момента времени $t_П$ в виде $t_П=t+\Delta$, где $\Delta\geq 0$ – малое приращение.

Составляя разность функции p при значениях времени t и $t+\Delta$ и переходя к пределу при $\Delta\to 0$, можно получить общую форму первой производной функции p по времени t. После преобразований и разложения в ряд Тейлора с удержанием первых двух членов, можно получить первое уравнение Колмогорова в виде

$$-\frac{\partial\, p\,(t,\,x,\tau,\,y)}{\partial t}=\frac{\partial\, p\,(t,\,x,\tau,\,y)}{\partial x}a(t,x)+ \\ +\frac{1}{2}\frac{\partial^2 p\,(t+\Delta,\,x,\,\tau,\,y)}{\partial x^2}b(t,x)+\lim_{\Delta\to 0}R_3\,, \qquad (2)$$

где

$$a(t,x)=\lim_{\Delta\to 0}\int_{-\infty}^{\infty} p\,(t,\,x,\,t+\Delta,\,z)(z-x)\partial z= \\ =\lim_{\tau\to t}\frac{1}{\tau-t}M\left[U(\tau)-U(t)\right],$$

$$b(t,x)=\lim_{\Delta\to 0}\int_{-\infty}^{\infty} p\,(t,\,x,\,t+\Delta,\,z)(z-x)^2\,\partial z= \\ =\lim_{\tau\to t}\frac{1}{\tau-t}M\left[U(\tau)-U(t)\right]^2$$

– пределы отношений математических ожиданий $M[U(\tau)-U(t)]$ и $M[U(\tau)-U(t)]^2$, соответственно, приращения $U(\tau)-U(t)$ и его квадрата за бесконечно малый промежуток времени $(\tau-t)\to 0$ к этому промежутку времени;

$U(t)$ и $U(\tau)$ – ординаты процесса в текущий и будущий моменты времени;

$\lim_{\Delta\to 0}R_3$ – остаток ряда Тейлора, начиная с третьего члена.

В большинстве технических приложений, к которым можно отнести процессы анализа ЭМС и оценки технического состояния ЭУ АЭС, этим остатком можно пренебречь. В теории стохастических функций такие процессы получили название диффузионных, а коэффициенты $a(t,x)$ и $b(t,x)$ можно рассматривать как интенсивности рассматриваемого случайного процесса. В классической трактовке данного уравнения [2] они получили названия, соответственно, коэффициентов сноса и диффузии. Они представляют собой математические ожидания и дисперсии диагностических признаков.

Теперь окончательно с учётом принятых обозначений первое (или обратное) уравнение Колмогорова для диффузионных процессов можно записать в компактном виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t}+a(t,x)\times\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{2}b(t,x)\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}=0\,. \qquad (3)$$

Вывод второго уравнения (или прямого) Колмогорова несколько отличается от предыдущего прежде всего тем, что связан со сменой переменных в определении коэффициентов $a(\tau,y)$ и $b(\tau,y)$ и, соответственно, второго и третьего членов уравнения, которое по аналогии с первым можно записать в виде

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial y}\left[a(\tau,y)\times p\right]+ +\frac{1}{2}\times\frac{\partial^{2} p}{\partial y^{2}}\left[b(\tau,y)\times p\right]=0. \tag{4}$$

Это уравнение часто встречается в задачах теоретической физики под названием уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова.

Если анализ ЭМС производится по множеству m диагностических признаков технического состояния ЭУ ЭС, то их изменения можно представить вектором U, состоящим из случайных функций $U\{U1, U2,\ldots, Um\}$. Обозначим в векторной форме $X=X(t)=X_1(t), X_2(t),\ldots, X_m(t)=x_1, x_2,\ldots, x_m$ и $Y=Y(\tau)=Y_1(\tau), Y_2(\tau),\ldots, Y_m(\tau)=y_1, y_2,\ldots, y_m$ ординаты процесса U для текущего t и будущего τ моментов времени, то есть при $t<\tau$.

Если вектор $U=U(t)$ представляет собой m – мерный Марковский процесс, то можно констатировать, что условная плотность вероятности ординат Y при фиксированных ординатах X не зависит от ординат процесса $U(t)$ для моментов времени, предшествующих t. Иначе говоря, как и в предыдущем случае для одномерных процессов, ординаты в будущий момент времени однозначно определяются их значениями в настоящий момент времени и не зависят от прошлых значений.

По аналогии с предыдущим для исследуемой ЭУ АЭС условная плотность вероятности $p(t,x_1,x_2,\ldots,x_m,\tau,y_1,y_2,\ldots,y_m) = p(t,X,\tau,Y)$ перехода из состояния X в момент времени t в состояние Y в момент времени τ определяется с помощью выражения, получившего название обобщённого векторного уравнения Маркова [2]:

$$p(t,X,\tau,Y)= =\int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int_{-\infty}^{\infty} p(t,X,t_{П},Z)\times p(t_{П},Z,\tau,Y)\times dZ, \tag{5}$$

где $t<t_П<\tau$, $Z=U(t_П)$ – векторная ордината процесса U в промежуточный момент времени $t_П$. Названную выше плотность вероятности по определению можно считать нормированной по аргументам Y. Поэтому

$$\int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int_{-\infty}^{\infty} p(t,x_1,x_2,\ldots,x_m,t_П,y_1,y_2,\ldots,y_m)\times dy_1\times dy_2\ldots dy_m= =\int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int_{-\infty}^{\infty} p(t,X,\tau,Y)\times dy=1. \tag{6}$$

Вывод уравнений Колмогорова в многомерном случае по порядку его выполнения не отличается от одномерного случая. Аналогичным образом рассматриваются изменение плотности вероятности $p(t,X,\tau,Y)$ при малом приращении времени $t_П=t+\Delta$, предельный переход при $\Delta\to 0$, дающий возможность получить векторную производную в виде

$$-\frac{\partial\, p\,(t,X,\tau,Y)}{\partial t}= =\lim_{\Delta\to 0}\int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int_{-\infty}^{\infty} p\,(t,X,\tau,Y)\times\left[p\,(t,X,t+\Delta,Z)-p\,(t+\Delta,X,\tau,Y)\right]\times dZ \tag{7}$$

и её разложение вблизи точки $X=Z$ в ряд Тейлора с удержанием двух первых членов и пренебрежения остатком ряда

$$p(t+\Delta,Z,\tau,Y)=p(t+\Delta,X,\tau,Y)+ +\sum_{j=1}^{m}\frac{\partial\, p(t+\Delta,X,\tau,Y)}{\partial x_j}(z_j-x_j)+ +\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\frac{\partial^{2} p(t+\Delta,X,\tau,Y)}{\partial x_j\times\partial x_l}(z_j-x_j)\times(z_l-x_l). \tag{8}$$

В этих условиях, используя терминологию [2], можно классифицировать процесс изменения технического состояния ЭУ АЭС как диффузионный. При этом соответствующие изменения заданного набора диагностических признаков из их совокупности, определённой в [4], можно использовать для описания переходной плотности с помощью первого уравнения

Колмогорова [2]. Представим его в многомерном виде в матричной форме:

$$\frac{\partial p}{\partial t}+a(t,X)\cdot\frac{\partial p}{\partial x_j}+\frac{1}{2}b(t,X)\cdot\frac{\partial^2 p}{\partial x_j\partial x_l}=0\,, \quad (9)$$

где $a(t,X)=[a_j(t,X)]_{j=1}^{m}$ и $b(t,X)=[b_j(t,X)]_{i,j=1}^{m}$, соответственно, вектор сноса и квадратная матрица диффузии.

Второе уравнение Колмогорова для плотности вероятности $p(t+\Delta,X,\tau,Y)$ можно записать по аналогии с одномерным случаем в виде

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\sum_{j=1}^{m}\frac{\partial p}{\partial x_j}a_j(\tau,Y)\cdot p+$$
$$+\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\frac{\partial^2 p}{\partial y_j\partial y_l}b_{jl}(\tau,Y)\cdot p=0$$

или в компактной матричной форме:

$$\frac{\partial p}{\partial t}+a(\tau,Y)\cdot\frac{\partial p}{\partial x_j}+$$
$$+\frac{1}{2}b(t,Y)\cdot\frac{\partial^2 p}{\partial x_j\partial x_l}=0, \quad (10)$$

где элементы вектор сноса $a(\tau,Y)=[a_j(\tau,Y)]_{j=1}^{m}$ и квадратной матрицы диффузии $b(\tau,Y)=[b_j(\tau,Y)]_{i,j=1}^{m}$, соответственно, определяются также, как и для первого уравнения Колмогорова, только с заменой по определению аргументов на τ и Y. Их вычисление в принципе не отличается от одномерного случая и определяется условиями на границах рассматриваемых процессов и времени.

Это уравнение в принятых выше обозначениях переменных и моментов времени описывает распределение значений процесса $U(\tau)$ в зависимости от его начальных значений $U(t)$. Если начальное значение детерминированное, то решение этого уравнения должно удовлетворять условию $p=\delta[U(\tau)-U(t)]$ при $U(t)\in\Omega$, $\tau\to t$.

Если, как уже говорилось выше, допустить, что изменения названного диагностического признака состояния объекта ЭС являются Марковским случайным процессом, то, решая уравнение (10), можно определить различные показатели ЭМС исследуемого объекта АЭС, в частности, вероятность работы без нарушений ЭМС на заданном отрезке времени. Это важнейшая эксплуатационная характеристика электрооборудования, во многом определяющая надёжность его работы.

Другой существенный технологический показатель, который может быть определён в результате применения Марковских моделей, это математическое ожидание времени достижения предельной граничной поверхности обеспечения ЭМС при заданном распределении начальных значений вектора $U(t)$. В технических приложениях анализа перенапряжений, возникающих на электроустановках АЭС, это связано с определением их ресурсов, а также ресурсов защитных и коммутационных аппаратов и др.

При этом используется важнейшее свойство Марковских процессов, заключающееся в том, что плотность вероятности $p(t,X,\tau,Y)$ подчиняется системе обобщённых дифференциальных уравнений в частных производных Маркова и Колмогорова для вектора, отражающего изменения диагностических признаков $U(t)$.

Стохастические Марковские модели, применяемые для анализа ЭМС разнообразных ЭУ АЭС, включают в себя математические описания, с одной стороны, самих ЭУ, в которых необходим учёт выработки технологических ресурсов (старения). С другой стороны, как уже говорилось выше, в АЭС непрерывно возникают электромагнитные и другие явления, часть энергии которых является причиной ЭВФВ на электроэнергетические объекты и установки.

В свою очередь, определенная доля энергии ЭВФВ порождает электромагнитные

(ЭМП) и другие физические помехи на объектах АЭС. Их можно представить в виде различных математических моделей с использованием равномерных, экспоненциальных, гауссовских и других распределений и, в том числе, так называемых белых шумов [2, 4].

Важнейшим положением моделирования внешних ЭМП, приходящих на ЭУ, является то, что их можно рассматривать как результат прохождения ЭВФВ через некоторый абстрактный фильтр, который отбирает часть энергии ЭВФВ, направляя её мимо исследуемого объекта. Приближённо его можно считать линейным на всём диапазоне параметров ЭВФВ (ЭМП) или квазилинейным с линеаризацией по участкам. С той или иной степенью абстракции таким образом моделируются многие виды ЭМП при анализе ЭМС. Фильтр является необходимым элементом моделирования ЭВФВ (ЭМП), поскольку чаще всего его характеристики известны или могут быть определены на уровне появления внешнего или внутреннего возмущения.

Для получения обобщённой стохастической модели в виде диффузионного Марковского процесса в неё должны быть введены компоненты, которые описывают процессы, происходящие в фильтре, как сепараторе энергии ЭВФВ. С практической точки зрения в качестве такого фильтра можно рассматривать модели, построенные на основе схем замещения сетей, систем электроснабжения, ЭУ АЭС, конкретных аварийных ситуаций, например, коротких замыканий, ударов молнии, пробоев изоляции и др.

Отметим, что в одном процессе может участвовать несколько фильтров. Они по существу являются отражением совокупности физических явлений, которые, как было сказано выше, отбирают определённую часть энергии ЭФВ. В частности, специфическими фильтрами являются средства и системы защиты объектов ЭС от опасных ЭФВ. Так, например, нелинейные ограничители перенапряжений и вентильные разрядники по принципу своего действия направляют значительную часть энергии ЭФВ в заземлитель мимо защищаемого объекта. Физически это происходит вследствие перемещения рабочей точки режима работы защитного аппарата в ту часть нелинейной вольт-амперной характеристики, которая имеет малое эквивалентное сопротивление.

Можно отметить такой характерный момент, как выделение части энергии ЭФВ в виде перенапряжения на наиболее ответственном элементе АЭС, каковым является силовой генератор или двигатель. Кроме того, увеличение амплитуды входной волны приводит к увеличению амплитудного значения ЭМП – перенапряжения на оборудовании. Увеличение же длины фронта (уменьшение крутизны) приводит к обратному результату.

Таким образом, решение стохастической задачи анализа ЭМС для силового оборудования АЭС в сети основного напряжения при внешних поражениях объекта может быть сформулировано следующим образом.

1. Определение вероятностных законов распределения существенных параметров электромагнитного явления – разряда молнии и его части ЭВФВ в виде волны перенапряжения на элементах АЭС. Не останавливаясь здесь на особенностях физико-математической модели удара молнии в объект или в непосредственной близости от него (этот вопрос подробно обсуждается в [5]), используем её результаты.

Они позволяют выполнить формирование модели молнии в виде статистических распределений амплитуды, крутизны и продолжительности импульса, приведённых в [5]. Используя их, можно получить соответствующие интегральные распределения параметров волн внешних перенапряжений – амплитуд и крутизн волн перенапряжений в местах их возникновения [5].

2. В соответствии с приведёнными положениями и методами моделирования волновых процессов в АЭС строится система фильтров. Они отражают процессы перемещения, деформации и затухания волн перенапряжений и определяют по существу значения перенапряжений (ЭМП) и диагностических параметров, характеризующих состояние основного объекта.

3. Производится реализация Марковского подхода к решению рассматриваемой задачи, заключающаяся в приближённом определении коэффициентов сноса и диффузии $a(\tau,y)$ и $b(\tau,y)$. Затем производится приближённое построение и решение системы уравнений Колмогорова, нахождение с помощью функциональных аппроксимаций и численных методов зависимости $p=p(t,x,\tau,y)$. Она является условной плотностью вероятности для ординат процесса $U(t_j)$ при заданных граничных условиях, определяемых по данным конкретного технического приложения, то есть задачи анализа ЭМС.

Библиографический список

1. Протопопов, В.А. Идентификация качества функционирования логико-динамических систем авиационного оборудования в задачах сертификации на этапах жизненного цикла [Текст] / В.А. Протопопов, М.В. Воробьев, И.Е. Разуменко // Проблемы эксплуатации авиационного оборудования: тез. док. – К.: КИИГА, 1993. – С. 67-72.
2. Свешников, А.А. Прикладные методы теории марковских процессов [Текст]: учеб. пособие / А.А. Свешников. – СПб.: Изд-во «Лань», 2007. – 192 с.
3. Гольдштейн, В.Г. О проблемах электромагнитной совместимости в электроснабжении, электротехнических комплексах и системах [Текст] / В.Г. Гольдштейн // Вестник СамГТУ. Вып. 13, Технические науки. – Самара, 2001. – С. 219-224.
4. Гольдштейн, В.Г. Техническая диагностика, повреждаемость и ресурсы силовых и измерительных трансформаторов и реакторов [Текст] / В.Г. Гольдштейн, А.Ю. Хренников. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 320 с.
5. Бобров, В.П. Перенапряжения и защита от них в сетях 110-750 кВ [Текст] / В.П. Бобров, В.Г. Гольдштейн, Ф.Х. Халилов. – М.: Энергоатомиздат, 2005.

References

1. Protopopov, V.A. Identification of quality of operation of logic-dynamic systems of aircraft equipment in problems of certification at stages of the life cycle [Text] / V.A. Protopopov, M.V. Vorobyov, I.Ye. Razumenko // Problems of exploitation of aircraft equipment: tez. doc. – K.: KIIGA, 1993. – PP. 67-72.
2. Sveshnikov, A.A. Applied methods of the theory of Markovian processes [Text]: teaching aid / A.A. Sveshnikov. – SPtb.: Lan, 2007. – 192 p.
3. Goldshtein, V.G. Problems of electromagnetic compatibility in electrical power supply, electrotechnical complexes and systems [Text] / V.G. Goldshtein // SamGTU bulletin. Issue 13, Engineering sciences. – Samara, 2001. – PP. 219-224.
4. Goldshtein, V.G. Technical diagnostics, mortality and resources of power and measuring transformers and reactors [Text] / V.G. Goldshtein, A.Yu. Khrennikov. – M.: Energoatomizdat, 2007. – 320 p.
5. Bobrov, V.P. Overvoltages and protection against them in networks 110-750 kV [Text] / V.P. Bobrov, V.G. Goldshtein, F. Kh. Khalilov. – M.: Energoatomizdat, 2005.

USING STATISTICAL MARKOV MODELS FOR THE ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF AUTONOMOUS ELECTRIC INSTALLATIONS

© 2011 Yu. P. Kubarkov, V. G. Goldshtein, L. M. Inahodova

Samara State Technical University

The paper deals with the basic principles of stochastic modeling in problems, related to the analysis of electromagnetic compatibility (EMC) of electric equipment of autonomous electric installations. Conditions of solving EMC problems are stated on the basis of Markov and Kolmogorov equations, as well as construction of filters taking into account physical processes in electric installations (EI).

Electrical power supply, electrical engineering complex, autonomous power system, simulation, operating mode, electromagnetic compatibility.

Информация об авторах

Кубарьков Юрий Петрович, кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы», Самарский государственный технический университет, tsara.cuba@yandex.ru. Область научных интересов: моделирование режимов работы электрического оборудования технических комплексов и систем.

Гольдштейн Валерий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Автоматизированные электроэнергетические системы», Самарский государственный технический университет, aees@rambler.ru. Область научных интересов: электромагнитная совместимость высоковольтного электроэнергетического оборудования при воздействиях перенапряжений.

Инаходова Лолита Меджидовна, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Автоматизированные электроэнергетические системы», Самарский государственный технический университет, aees@rambler.ru. Область научных интересов: электромагнитная совместимость высоковольтного электроэнергетического оборудования при воздействиях перенапряжений.

Kubarkov Yury Petrovitch, candidate of technical sciences, associate professor, doctoral of the department “Automated electrical power systems”, Samara State Technical University, tsara.cuba@yandex.ru. Area of research: simulation of operating modes of electrical equipment of engineering complexes and systems.

Goldshtein Valeriy Guennadievitch, doctor of technical sciences, professor, the department “Automated electrical power systems”, Samara State Technical University, aees@rambler.ru. Area of research: electromagnetic compatibility of high-voltage electrical engineering equipment under current overvoltade.

Inahodova Lolita Medjidovna, candidate of technical sciences, associate professor, the department “Automated electrical power systems”, Samara State Technical University, aees@rambler.ru. Area of research: electromagnetic compatibility of high-voltage electrical engineering equipment under overvoltage.