УДК 621.31:332

МОДЕЛІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖ SMART GRID

Друзь В. О., Мороз О. М., Черемісін М. М.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

Проведена класифікація математичних моделей, які використовують при моделюванні процесів в енергетичних мережах Smart Grid.

Постановка проблеми. Одним із напрямків реформування та розвитку енергетичного сектору України є підвищення рівня безпеки і надійності електропостачання та безперебійного функціонування енергетичного ринку. Ці питання можуть вирішуватись на основі впровадження "розумних мереж", тобто систем Smart Grid, які інтенсивно розвиваються в передових країнах світу. Таке впровадження не можливе без моделювання систем інтелектуальних мереж та визначення проблемних питань, які впливають на розвиток "розумних мереж".

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують різні концепції моделювання систем інтелектуальних мереж Smart Grid [2, 4]. Виділяють ряд концептуальних моделей, які є методами максимуму ентропії [1]. В роботі [6] здійснена спроба аналізу і систематизації математичних моделей SCADA, як є узагальненням систем інтелектуальних мереж Smart Grid. Але автор залишив без уваги динамічні системи масового обслуговування з нестаціонарним процесом приросту точок обліку, які зводяться до квазістатистики в обраному секторі мережі. Отже, запропонована [6] класифікація не є повною. Наприклад, моделювання навантаження на обладнання в умовах змінної структури ринку споживання, якщо така зміна не є стаціонарним багатовимірним випадковим процесом, який має деяке обмеженням на момент часу.

Мета статті. Пропонується можливість застосування класифікації математичних моделей моделювання навантажень обладнання систем «розумних мереж».

Основні матеріали дослідження. Розглянемо можливість застосування класифікації математичних моделей при моделюванні навантажень на обладнання систем інтелектуальних мереж Smart Grid в умовах мінливої структури ринку споживання (табл. 1). Обмеження, зазначені в табл. 1, пояснюються властивостями моделей, які розглянуті нижче.

Системи захисту які перевіряють і контролюють себе [5]. Для таких систем вводиться поняття підстанції, засноване на інтелектуальному захисті гібридного модуля самоперевірки, який є інтелектуальним електронним пристроєм, що контролює себе і входить до складу підстанції. Модуль самоперевірки приєднується до телекомунікаційної мережі, де використовуються утиліти запуску та управління мережею енергосистем. Дизайн модуля самоперевірки повинен бути таким, щоб гарантувати перекриття існуючих елементів контролю при збільшенні системи. Філософія цього концепту істотно залежить від телекомунікаційної мережі, безпека якої є ключовим фактором.

Таблиця 1 – Класи моделей та їх недоліки

Клас моделі	Недоліки
Системи захисту які перевіряють і контролюють себе	Не відображують структуру споживання електроенергії, тому мало використовуються
Еволюційні моделі	Не враховують нестаціонарні процеси
Мережі з випадковими запобіжниками	Не враховують надійність сукупності елементів як єдине ціле
Нейроні мережі	Потребують додаткових ресурсів для навчання
Марківські процеси	Обмежені відомими станами системи за умови, що потік подій відповідає відомому закону розподілу

При моделюванні систем захисту, які перевіряють і контролюють себе, зазвичай використовується наступний математичний апарат: методи статистики (МС), теорія ймовірності (ТЙ), експоненціальні автомати, засновані на теорії графів (ТГ).

Теорія перколяції використовується для дослідження мереж з випадковим запобіжниками. У фізиці перколяцією або протіканням називають загальне явище просочування рідини або газу, тобто флюїду, через пористе середовище. Із фізичним явищем пов'язана математична теорія протікання, основною задачею якої є знаходження нерозривного шляху на певній невпорядкованій решітці. Теорія перколяції знаходить застосування при описі різних систем і явищ, в тому числі таких, як поширення епідемій і надійності комп'ютерних мереж.

Явище перколяції визначається такими чинниками: середовищем, в якому спостерігається явище; зовнішнім джерелом, що забезпечує протікання в цьому середовищі; способом протікання середовища, яке залежить від зовнішнього джерела. В якості найпростішого прикладу є модель протікання (на прикладі електричного пробою) в двовимірній квадратній решітці, що складається з вузлів, які можуть бути провідниками або діелектриками. У початковий момент часу всі вузли сітки діелектричні, потім в джерелі діелектричні вузли замінюються провідниковими, і число провідникових вузлів поступово збільшується. При цьому вибір вузла для заміщення є випадковим для всієї поверхні решітки.

Перколяцією є момент появи, такого стану решітки, при якому існує хоча б один неперервний шлях до протилежного краю через сусідні провідникові вузли.

Концепт мережі з випадковими запобіжниками доцільно використовувати для прогнозу перегорання запобіжників і діодів в мережі. Використання математичного моделювання дозволяє запобігти перевантаження в мережі і прогнозувати фазові переходи та інші процеси, зокрема вихід з ладу обладнання.

Кластер в теорії перколяції – це послідовність пов'язаних об'єктів. Кластер, який об'єднує протилежні сторони системи, називається перколяційним, нескінченним, або з'єднувальним. Вважається, що поблизу точки фазового переходу основні величини, які характеризують систему, є неаналітичними. Передбачається, що довільна функція $f(x)$ поблизу точки x_0 може бути представлена так

$$f(x) = f_0 + f_1(x - x_0) + f_2(x - x_0)^2 + f_3(x - x_0)^{1.3} + f_4(x - x_0)^{1.5},$$

де $f_0 + f_1(x - x_0) + f_2(x - x_0)^2$ – аналітична частина, $f_3(x - x_0)^{1.3} + f_4(x - x_0)^{1.5}$ – неаналітична частина.

Вираз неаналітичної частини $f_3(x - x_0)^{1.3}$ називається критичною або сингулярною частиною, що в даному випадку означає функцію $sing\, f(x) = [f(x)]_{sing} = s_x f(x) \alpha f_3(x - x_0)^{1.3}$ яка сама чи її похідна, обертається в безкінечності будь-якої точки.

Перколяція розділяє дві фази: в одній існують кінцеві кластери, в іншій – один нескінченний кластер. У перколяції концентрація зайнятих вузлів відіграє таку ж роль, як температура в температурних фазових переходах.

Багато важливих характеристик кластера поблизу переходу описуються експоненціальною функцією з різними критичними показниками, що не залежать від виду решітки і типу перколяції, а залежними тільки від розмірності простору завдання. Класифікація математичних моделей, представлена в (табл. 2), свідчить про те, що нейронні мережі за класифікаційними ознаками і відповідно до парадигми складають один клас математичних моделей.

Для керування мережею енергопостачання часто використовують нейронні мережі [7-12,14], інтерес до яких зумовлений бажанням зрозуміти принципи роботи нервової системи і сподіванням наближення до такої ефективності процесів обробки інформації, якою володіють тварини і людина.

В теорії нейронних мереж існує більше десяти напрямків (парадигм) рішення теоретичних і прикладних завдань. Особливим напрямком є вивчення роботи осциляторних нейронних мереж (ОНМ) [10], які використовуються для моделювання систем інтелектуальних мереж Smart Grid. Осцилятор - це безліч спільно функціонуючих елементів (нейронів), здатних працювати в коливальному режимі. При математичному моделюванні зручно представляти ОНМ у вигляді окремих, взаємодіючих між собою, осциляторів.

Відмінною особливістю деяких осциляторів є наявність в їх структурі збуджуючих і гальмівних нейронів (нейронних популяцій), різних за характером впливу: збуджуючі нейрони збільшують, а гальмівні зменшують активність інших елементів мережі. Такі осцилятори називаються нейронними.

Осцилятори описується системою диференціальних рівнянь (ДР), іноді з випадковим шумом. Таких рівнянь може бути декілька десятків або сотень у разі детального врахування специфіки біологічних нейронів. Якщо вивчення проводиться на рівні нейронних популяцій, то розглядаються зазвичай два - п'ять рівнянь, що описують усереднену по ансамблю динаміку кожної популяції. У разі фазового осцилятора розглядається тільки одна змінна - фаза коливань.

Таблиця 2 – Класифікація математичних моделей

Клас моделі	Парадігма	Математичний апарат					Застосування при моделюванні
		Системи ДР	ТГ	ТЙ і МС		МП	
				Одномірна	Багатомірна		
Системи захисту, які перевіряють і контролюють себе	Експонентний автомат	–	+	+	–	–	Системи з автоматичною зупинкою та запуском
Еволюційні	Генетичний алгоритм	+	+	+	–	–	Розвитку Smart Grid
Мережа з випадковими запобіжниками	Перколяція	–	+	+	–	–	Надійності
Нейроні мережі	Фазовий осцилятор	+	–	+	–	–	Управління мережею енергопостачання
Марківські процеси	Марківський процес	+	–	+	–	+	Енергосистеми на основі використання СМО
Нестаціонарні багатовимірні випадкові поля в процесі еволюції	Нестаціонарне багатовимірне випадкове поле	+	+	+	+	+	Оцінки граничних технічних параметрів

+ - використовуються, – - не використовуються.

Залежно від архітектури зв'язків між осциляторами розглядають ОНМ двох типів: повнозв’язні мережі осциляторів і мережі з локальними зв'язками. У першому випадку кожен з осциляторів пов'язаний з усіма іншими осциляторами, у другому – кожен осцилятор пов'язаний тільки з осциляторами із оточення фіксованого радіуса. Іноді враховуються тимчасові затримки в зв'язках. Осциляторні нейронні мережі загального вигляду зі слабкими зв'язками зводяться до мережі фазових осциляторів.

У загальному вигляді осцилятор описується системою m автономних диференціальних рівнянь

$$\frac{\partial x}{\partial t} = F(x), x \in R^m. \qquad (1)$$

При допущенні, що в фазовому просторі осцилятора існує асимптотично стійкий цикл з періодом

2*p/w*, в малій окружності можна вибрати нові координати (*q, y*). При цьому *q* - фаза руху по циклу, а *y* і R^{m-1} – координати нормального перетину (на циклі *y* = 0). У нових координатах рівняння (1) має вигляд

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \omega, \qquad \frac{\partial y}{\partial t} = \alpha(\omega) y + O(\|y\|^2),$$

При припущенні, що осцилятори в ОНМ з’єднані слабкими зв'язками порядку *ε*

$$\frac{\partial x_k}{\partial t} = F_k(x_k) + \varepsilon G_k(x_1, ..., x_N), \qquad x \in R^m, k = 1, ..., N.$$

у разі парних і адитивних зв'язків між осциляторами, це рівняння буде мати такий вид

$$\frac{\partial x_k}{\partial t} = F_k + \varepsilon \sum_j G_{kj}(x_k, .x_j), \qquad x \in R^m, k = 1, ..., N.$$

При ε=0 в результаті прямого виконання лімітних циклів матимемо *N* - мірний інваріантний тор (початкова фаза q^0 на кожному лімітному циклі може бути обрана довільно), який зберігається при значеннях ε > 0 (чим сильніше тяжіння до лімітних циклів окремих осциляторів, тим більші величини зв'язку *e* допустимі [7-12, 14]). У цьому випадку рівняння для фази *k*-го осцилятора ОНМ на інваріантному торі має вигляд

$$\frac{\partial x_k}{\partial t} = \omega_k \varepsilon \sum{}_j H_{kj}(\theta_k, \theta_j), \quad k = 1, ..., N. \qquad (2)$$

де H_{kj} – періодичні функції, одержані а результаті використання метода усереднення і які залежать від типу осцилятора (вектор функції $F_k(x)$), а також від архітектури і типу зв’язків (вектор функції $G_{kj}(x)$). Осцилятори, які задовільняють рівняння (2), вважають фазними. Звичайна форма запису спеціального виду функцій H_{kj} для ОНМ: H_{kj} (q_j, q_k) = sin (q_j – q_k). Для ОНМ з локальними зв'язками вважається, що осцилятори розміщені у вузлах *d*-мірної решітки (*d* = 1, 2, 3, ...) і кожен осцилятор має зв'язок з осцилятором зі свого оточення фіксованого радіусу (зазвичай це зв'язку з *2d* найближчими сусідами). При *d = 1* мережа називається ланцюгом осциляторів.

Роботи, присвячені ОНМ з локальними зв'язками, поділяють на дві групи [13]. До першої групи належать мережі зі слабкими зв'язками, в яких осцилятори утворюють ланцюжок або кільце, до другої групи - мережі з сильними зв'язками і довільним розміром мережі. І ті й інші дослідження зводяться до вивчення мереж з фазовими осциляторами. Для моделей ОНМ використовується теорія ймовірності та диференціальні рівняння.

Марківські процеси використовують переважно для моделювання енергосистем, в яких генерація відбувається за рахунок енергії вітру [3]. Метою дослідження теорії масового обслуговування [13] є встановлення залежності між характером потоку замовлень, продуктивністю окремого каналу обслуговування (сукупність усіх технічних пристроїв, необхідних для обслуговування одного замовлення), числом каналів і ефективністю обслуговування. Залежно від умов завдання і цілі характеристиками ефективності обслуговування вважають: середній відсоток замовлень, які будуть виконані (відносна пропускна здатність системи); середній час простою окремих каналів і системи в цілому; середній час повного завантаження системи; середній час неповного завантаження системи; середній час перебування замовлення в системі; середнє число замовлень, що знаходяться в черзі, та інші.

Чисельні розрахунки, проведені при вирішенні задач теорії масового обслуговування, свідчать про те, що задовільне по точності рішення можна отримати, припустивши, що всі потоки, що діють на систему, - пуассонівські, тобто процес функціонування системи є безперервним марківським випадковим процесом. Випадковий процес з дискретними станами і безперервним часом називають марківським, якщо для будь-якого моменту часу *t* умовні ймовірності всіх станів системи в майбутньому (*t> 0*) залежать тільки від того, в якому стані перебуває вона в даний момент часу $t = t_i$, і не залежать від того, коли і як система опинилася в цьому стані.

Теорію марківських процесів з дискретними станами і безперервним часом застосовують до систем, в яких можуть відбуватися переходи з одного стану в інший під впливом зовнішніх випадкових збурень, передбачуваних пуассонівським потоком. Для пуассонівського потоку ймовірність появи випадкової події *k* раз протягом проміжку часу *t* обчислюється за формулою

$$p_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t},$$

де *λ* – інтенсивність потоку. Математична модель марківського процесу зводитися до системи

$$p_0(t+\Delta t) = p_0(t)\,(1 - \Delta t + \alpha_0(\Delta t));$$

$$p_k(t+\Delta t) = p_k(t)\,(1 - \Delta t + \alpha_0(\Delta t)) + p_{k-1}(t)(\lambda\Delta t + \alpha_1(\Delta t)) + \alpha_k(\Delta t)$$

яка зводиться до системи ДР:

$$\frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda p_0(t),$$

$$\frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda p_k(t) + \lambda p_{k-1}(t), k \geq 1. \qquad (3)$$

Система диференціально-різницевих рівнянь (3), задовольняє рівняння Чепмена - Колмогорова.

При розгляді однорідних марківських випадкових процесів в *Rn*, для яких оператор перехідних ймовірностей *P(t)* заданий перехідною щільністю *p(t, x, y),* ймовірність переходу з області *U* в область *W* за час *t* визначається у вигляді $\int_U dx \int_W dy p(t, x, y)$. Рівняння Чепмена – Колмогорова для густини має вигляд

$$p(t+s,x,y)=\int_{R^n} p(t,x,z)p(s,z,y)dz,$$

при $t > 0$, $t \to 0$ перехідна густини $p(t, x, y)$ наближається до δ – функції Дірака (при слабкому ліміті узагальнених функцій): $lim_{t\to 0}\, p(t, x, y) = \delta\,(x - y)$. В цьому випадку $lim_{t\to 0}\, P(t) = 1$. З допомогою оператора Q, діючого на функцію $f(x)\epsilon R^n$

$$(Qf)(x)=\int_{R^n} q(x,y)f(y)dy$$

пряме рівняння Колмогорова має вид

$$\frac{\partial p(t,x,z)}{\partial t}=\int_{R^n} p(t,x,z)q(z,y)dz$$

а зворотне рівняння Колмогорова –

$$\frac{\partial p(t,x,y)}{\partial t}=\int_{R^n} q(z,y)p(t,z,y)dz.$$

При застосуванні систем масового обслуговування (СМО) для енергетичних мереж Smart Grid, необхідно враховувати ймовірну багатоканальність СМО. Теорія масового обслуговування може бути застосована до моделювання процесів технічного супроводу та обслуговування систем Smart Grid. Для моделей СМО використовують такий математичний апарат: теорія ймовірності, диференціальні рівняння, системи диференціальних рівнянь.

У задачі моделювання інформаційних систем, де функція ефективності є цільовою, використовують еволюційні моделі [15,]. В теорії еволюційного моделювання використовується поняття "елітизм", яке визначається як операція, що забезпечує виживання типу примірників з кращою цільовою функцією ефективності. Це дозволяє не втрачати найкращі рішення в процесі еволюції. З точки зору дослідників [15], важливим є схожість примірників в популяції і, головне, – зв'язок цієї схожості з ефективністю.

Алгоритми еволюції мають три особливості:

1) кожна нова популяція складається тільки з життєздатних екземплярів;

2) кожна нова популяція краще (щодо цільової функції), ніж попередня;

3) в процесі еволюції наступна популяція залежить тільки від попередньої.

В літературі по еволюційному моделювання частіше використовують термін "хромосома", ніж "тип примірника". Для технічних систем поняття «хромосома" і "тип примірника" аналогічні поняттю "граф системи".

Для кількісної оцінки "шаблонів" примірників введені дві характеристики: порядок шаблону (графа) - $o(H)$ і певна довжина шаблону (графа) – $\delta(H)$. Порядок шаблону – число закріплених позицій. Наприклад, шаблон *H (0 *****)* має порядок, що дорівнює одиниці $(o(H) = 1)$. Певна довжина шаблону – це відстань між першою і останньою позиціями нулів або одиниць. Наприклад, для схеми *H (011 *1 **)* отримуємо $\delta(H) = 5 - 1 = 4$, а для схеми *H (0 *****)* – $\delta(H) = 1 - 1 = 0$.

В теорії генетичних алгоритмів визначений оператор рекомбінації OR як функція, що описує побудову нового покоління із батьків і нащадків. При виконанні оператора рекомбінації шаблони копіюються пропорційно їх цільовій функції, тобто деякий шаблон буде обраний для наступної популяції з вірогідністю

$$P_i(RO)=f_i(x)\left(\sum_{i=1}^{N_p} f_i(x)\right)^{-1}$$

Припустивши, що шаблон H присутній в популяції P^t (популяція P після реалізації t генерацій еволюційного алгоритму) і $m\,(H, t)$ - число типів примірників популяції P^t, які є елементами шаблону H. Після отримання набору популяцій, що не перетинаються, розміром N_p і переміщення частини типів екземплярів з популяції P^t (в даному випадку t – номер покоління або умовний параметр часу) можна очікувати, що буде отримано $m\,(H, t+1)$ представників шаблону H в популяції P^{t+1} Тоді

$$m(H,t)=m(H,t)N_p f_i(H)\left(\sum_{i=1}^{N_p} f_i(x)\right)^{-1},$$

де $f_i(H)$ – середня цільова функція типів, представлена схемою H в генерації t. Якщо цільова функція для всієї популяції має вид

$$\bar{f}=\frac{1}{N_p}\sum_{i=1}^{N_p} f_i(x)$$

то можна записати:

$$m(H,t+1)=\frac{m(H,t)N_p f_i(H)}{f(x)}. \tag{4}$$

З виразу (4) видно, що цільова функція певного шаблону змінюється як відношення середньої цільової функції шаблону до попереднього значення цільової функції популяції.

В роботі [15] розглянуто вплив модифікованих операторів мутації OM на можливість виживання хромосоми з кращою цільовою функцією в наступних поколіннях. Виживання одиничної позиції має ймовірність $1\text{-}P\,(OM)$, де $P\,(OM)$ - ймовірність мутації. Шаблон H виживає, коли кожна із закріплених за ним позицій виживає. При зведенні $1\text{-}P\,(OM)$ в ступінь $o(H)$ ймовірність виживання складе $(1 - P(OM))^{O(H)}$. При $P\,(OM) << 1$ ймовірність виживання шаблону може бути представлене виразом: $P_3(s) = 1 - 0(H)\beta P(OM)$ де β – коефіцієнт, який визначає застосування модифікованих оператором мутації $\beta \approx 1,3$. В цьому випадку довільний шаблон H отримує очікуване число копій в наступній генерації після модифікованих операторів рекомбінації, кросинговеру і мутації

$$m(H,t+1) > \frac{\mathrm{m(H,t)f(H)(L-1-}\alpha\mathrm{P(OK)}\delta\mathrm{(H))}}{\mathrm{f(x)(L-1)}} \qquad (5)$$
$$\mathrm{0(H)}\beta\mathrm{P(OM)}.$$

де *ОК* – оператор кросинговеру, що моделює процес схрещування особистостей.

Вираз (5) є модифікованою фундаментальною теоремою генетичних алгоритмів [15]. Таким чином, для побудови еволюційних моделей використовують теорію ймовірності, теорію графів, математичне програмування (МП).

Висновок. Проведений аналіз концепцій моделювання систем інтелектуальних мереж Smart Grid дозволяє класифікувати підходи до математичного моделювання. Однак при цьому не враховувалися можливості моделювання за допомогою нестаціонарних багатовимірних випадкових полів, що описують систему обмежень впровадження інновацій на скалярному випадковому полі. Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що пропоноване рішення забезпечує єдиний підхід до моделювання систем інтелектуальних мереж Smart Grid, позбавлений зазначених недоліків.

Список використаних джерел

1. Gjorgjieva B. J. When are feedforward microcircuits well-modeled by maximum entropy methods? [Electronic resource] / B. J. Gjorgjieva, F. Rieke, E. Shea-Brown. – Mode of access: http://arxiv.org/pdf/1011. 2797v3.pdf.

2. Johnson A. P. The history of the smart Grid evolution at Southern California Edison / A. P. Johnson // Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). Conf. Publications. – Gaithersburg, MD. – 2010. – P. 1-3.

3. He M. Multiple Timescale Dispatch and Scheduling for Stochastic Reliability in Smart Grids with Wind Generation Integration [Electronic resource] / M. He, S. Murugesan, J. Zhang. – 2010. – Mode of access: http://arxiv.org/pdf/1008.3932v2.pdf.

4. Massoud S. Toward a Smart Grid / S. Massoud, Amin, B. F. Wollenberg // IEEE P&E Magazine. – 2005. – 3 (5). – P. 34-41.

5. Pelqim Spahiu Protection Systems that verify and supervise themselves [Electronic resource] / S. Pelqim, Ian R. Evans // IEEE ISGT Innovative Smart Grid Technologies Europe. – 2011. – Mode of access: http://www.ieeerisgtr2011.eu/wordpress/wprcontent/uploads/2012/01/ID9JselfrHealingr GridsJProtectionJsystems1

6. Sommerstad T. A Framework and theory for cyber security assessment. Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy / T. A Sommerstad. – Stockholm: Royal Institute of Technology, 2012. – 42 p.

7. Werbos P. J. Using Adaptive Dynamic Programming to Understand and Replicate Brain Intelligence: the Next Level Design [Electronic resource] / P. J. Werbos. – 2006. – Mode of access: http://arxiv.org/ftp/qrbio/ papers/0612/0612045.pdf.

8. Андрюхин А. И. Булевы модели самодиагностирования дискретных систем [Электронный ресурс] / А. И. Андрюхин, А. В. Кузнецов. – Режим доступа: http://masters.donntu.edu.ua/2001/fvti/kuznetsov/diss/lib/introspe/ index.htm.

9. Андрюхин А. И. Моделирование процессов в сетевых структурах / А. И. Андрюхин, С. В. Недбайло // Искусственный интеллект. – 2000. – № 1. – Режим доступа: http : // masters.donntu.edu.ua/ 2001/fvti/kuznetsov/diss/lib/netmodel/index.htm.

10. Борисюк Г. Н. и др. Осцилляторные нейронные сети. Математические результаты и приложения / Г. Н. Борисюк и др. // Математическое моделирование. – 1992. – 4, №1. – Режим доступа: http://masters.donntu.edu.ua/2001/fvti/kuznetsov/diss/lib/neuroosc/ index. htm.

11. Вайнцвайг М. Н. Механизм мышления и моделирование его работы в реальном времени / М. Н. Вайнцвайг, М. П. Полякова // Интеллектуальные процессы и их моделирование. – М.: Наука, 1987. – С. 208-229.

12. Введенов А. А. Нелинейные системы с памятью и моделирование функций нейронных ансамблей / А. А. Введенов, А. А. Ежов, Л. А. Книжникова и др. // Интеллектуальные процессы и их моделирование. – М.: Наука, 1987. – Режим доступа: http://masters.donntu.edu.ua/2001/fvti/kuznetsov/diss/lib/neuroans/index.htm.

13. Вентцель Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М.: "Сов. радио", 1972. – 552 с.

14. Губерман Ш. А. О соотношении восприятия и мышления в задачах искусственного интеллекта / Ш. А. Губерман. – М.: Наука, 1987.

15. Емельянов В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с.

Аннотация

МОДЕЛИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ SMART GRID

Друзь В. О., Мороз А. Н., Черемисин Н. М.

Проведена классификация математических моделей, используемых при моделировании процессов в энергетических сетях Smart Grid.

Abstract

MODELS OF MATHEMATICAL MODELING OF SMART GRID PROCESSES

V. Druz, O. Moroz, N. Cheremisin

Classification of mathematical models used in modeling processes in Smart Grid is carried out.