

Известия КГТУ им. И. Раззакова 17/2009  
УДК 004.72: 621.3.011.752

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ ПЕТРИ ДЛЯ УЗЛОВ ДИСКРЕТНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Асанова Салима Муратовна, Кыргызский Государственный Технический университет им. И.Раззакова,  
Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: a sm07@mail.ru

Цель статьи - разработка вычислительных сетей Петри для расчета узловых напряжений, используемых при формировании из них структурированных (многокомпонентных) итерационных последовательно-параллельных вычислительных алгоритмов для расчета переходных процессов в сложных электрических цепях, согласованных с методами дискретных схем замещения и узловых напряжений.

Ключевые слова: переходные процессы, метод дискретных схем замещения, узловые напряжения, сеть Петри, структурированный многокомпонентный вычислительный алгоритм.

## COMPUTATIONAL PETRI NETS FOR NODES OF DISCRETE EQUIVALENT CIRCUITS OF THE COMPLEX ELECTRIC CIRCUITS

Asanova Salima Muratovna, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Kyrgyz Republic,  
720044, Bishkek, Mir Avenue, 66, e-mail: a sm07@mail.ru

The purpose of article - the development of computer Petri networks for the calculation of nodal voltages used at the formation out of them the structured (multi component) iterative series- parallel computing algorithms for the calculation of transient processes in complicated electrical circuits, coordinated with the methods of discrete equivalent circuits, and of nodal voltages.

Keywords: transient processes, discrete method of equivalent circuits, nodal voltage, Petri network, structured multi component computing algorithm.

В работе [1] для удобства формирования и повышения вычислительной эффективности алгоритмов расчета переходных процессов в электрических цепях предлагается использовать метод дискретных схем замещения и аппарат вычислительных сетей Петри (ВСП) для его реализации. В связи с этим, в указанной работе разработаны для дискретных схем замещения двухполюсных резистивных, емкостных, индуктивных элементов и многополюсных индуктивно связанных элементов соответствующие им ВСП для расчета токов в них.

Поскольку узлы цепей являются связующими элементами, где устанавливаются равновесие токов ветвей, соединенных этими узлами, то для формирования ВСП, реализующих вычислительные алгоритмы расчета переходных процессов в электрических цепях, помимо вышеперечисленных ВСП [1], необходимы, также, ВСП для расчета узловых напряжений с учетом равновесия токов в узлах.

Постановка задачи. Разработать ВСП для расчета узловых напряжений, используемых при формировании из них и из ВСП для токов ветвей, приведенных в [1], структурированных (многокомпонентных) итерационных последовательно-параллельных (ПП) вычислительных алгоритмов для расчета переходных процессов в сложных электрических цепях, согласованных с методами дискретных схем замещения и узловых напряжений.

ВСП для расчета узловых напряжений дискретных схем замещения цепи.

В результате замены двухполюсных и многополюсных индуктивно связанных элементов сложной электрической цепи соответствующими им дискретными схемами замещения [1] вместо исходной цепи получим резистивную цепь. Далее, для простоты изложения, будем предполагать, что источники напряжения цепи преобразованы в эквивалентные источники тока. Если исходная цепь является линейной, то функциями времени  $0p$ ,  $p = 0, 1, 2, \dots$ , являются только значения источников тока дискретной схемы замещения. Если же в цепи содержатся нелинейные элементы, то соответствующие им проводимости дискретных схем также будут функциями времени. Для расчета такой схемы в каждый дискретный момент времени  $np$ ,  $p = 0, 1, 2, \dots$ , очевидно, можно применить все

методы анализа резистивных цепей. Среди широко используемых на практике является метод узловых напряжений, одними из важных достоинств которого - применимость для анализа цепей любой конфигурации, универсальность процедуры формирования уравнений и относительная простота ее реализации итерационными методами, например, Якоби, Гаусса-Зейделя и их модификации [2].

Для удобства введем обобщенный узел, где соединены концы определенного набора различных типов элементов (ветвей) - двухполюсных резистивных, емкостных, индуктивных и многополюсных индуктивно связанных. Из обобщенного узла получаются частные варианты узлов в результате задания количества элементов каждого типа, включая ноль. Аналоговая схема показана на рис. 1,а, а ее дискретная схема замещения - на рис. 1,б.

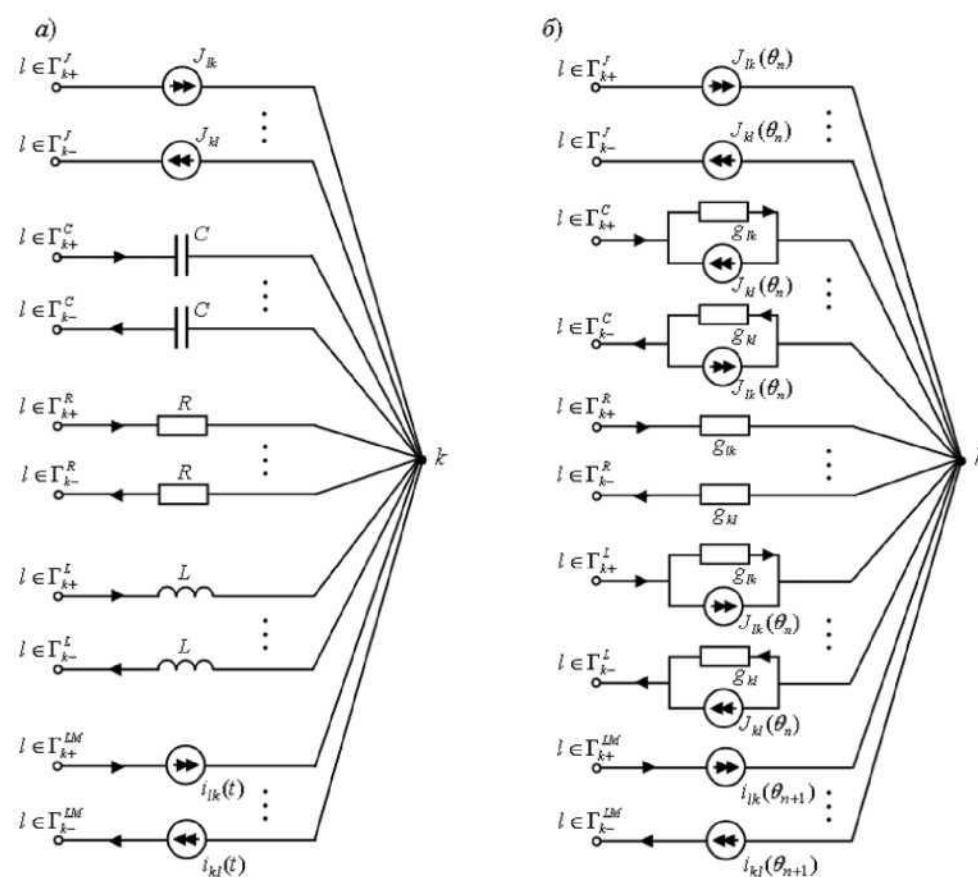


Рис. 1. Аналоговая схема обобщенного узла  $k$  (а); дискретная схема замещения (б)

Запишем для дискретного варианта обобщенного узла к (рис. 1,б) уравнение узлового напряжения и в дискретные моменты времени  $\nu n$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , в несколько иной форме в отличии от общепринятой и построим соответствующую этому узлу ВСП:

$$U_k(\nu n+1) = 40(\nu n+1), S_{kk} = Z S_{lk} + Z S_{ki}, \quad (1)$$

$$S_{kk} = I_{erS} + I_{erS}_-$$

$$(\nu n) = \dot{y}(\nu n) + i k L M (\nu n) + J(\nu n), (2)$$

$$4 S_0(\nu n+1) = Z S_{lk} U_{l0}(\nu n+1) + Z S_{kl} U_{0l}(\nu n+1) \quad (3)$$

$$I_{erS} + \{0\} = I_{erS} - \{0\}$$

$$N_{\nu+1} = Z (+\% N_{\nu+1}) + Z (-1) \bullet ' \ll N_{\nu+1}, \quad (4)$$

$$-LM = j - rLM$$

$$r_{k+} |^{\nu} r_{k-}$$

$$J_{u,(e)} = Z (+1) J_{lk}(\nu,) + Z (-1) \bullet J_l(\nu,), \quad (5)$$

$$I_{er}^{\circ}$$

$$r_{\#} = r_{k+} \cup r_{k+} \cup r_{+}, r_{/-} = r_{k-} \cup r_{k-} \cup r_{-}, \quad (6)$$

$$r_{+} = r_{+} \cup r_{-} \cup r_{+}, r_{k0} = r_{/-} \cup r_{k+} \cup r_{-}, \quad (7)$$

Здесь:  $u_{k0}(v_{p+1})$  - напряжение (1) узла  $k$  в дискретные моменты времени  $v_{p+1}$ ,

$n = 0, 1, 2, \dots$ ;  $i_{k0}(v_{p+1})$  - наложение токов  $i_{k0}(v_{p+1})$ ,  $i^{\wedge}(v_{p+1})$ ,  $J_{k0}(v_{p+1})$  на  $\wedge$ ом узле (2);

$i_{g0}(v_{p+1})$  - наложение токов в ветвях проводимостей  $g_i/(ft)$  от действия напряжений  $u_{t0}(v_{p+1})$ ,

$V_l$   $\in (\Gamma/+ \cup \Gamma/_-)\setminus\{0\}$  при  $u_{k0}(v_{p+1}) = 0$  (3), где  $\{0\}$  - базовый узел, напряжение которого  $u_{00} = 0$ ;  $i_{k0}(v_{p+1})$  - наложение токов  $i/k(v_{p+1} \times V/e\Gamma^{\wedge}$  и  $iM V/e\Gamma^{\text{TM}}$  (4), где

$\wedge_{1k}(v_{p+1})$  - ток ветви  $\{k/(/ \rightarrow >/(k))$  многополюсного индуктивно связанного элемента  $LM$  [1];  $J_0(v_{p+1})$  - наложение токов  $J(v_{p+1})$ ,  $V_l \in \Gamma^{\circ+}$  и  $J(v_{p+1})$ ,  $V_l \in \Gamma^{\circ-}$  (5) в дискретные моменты времени  $v_{p+1}$ ,  $p = 0, 1, 2, \dots$ , где  $J_{lk}(v_{p+1})$  при  $l \in \Gamma^{\circ+}$  и  $J_u(v_{p+1})$  при  $l \in \Gamma^{\circ-}$  - токи источников тока исходной цепи (рис.1,а) в дискретные моменты времени  $v_{p+1}$ ,  $p = 0, 1, 2, \dots$ , а  $J(v_{p+1})$  при  $l \in \Gamma^{\circ+}$  и  $J_M(v_{p+1})$  при  $l \in \Gamma^{\circ-}$  - токи источников тока дискретных схем замещения двухполюсных емкостных и индуктивных элементов.

Схема ВСП для реализации (1)-(7) показана на рис. 2. Используется она при

составлении ВСП для расчета узловых напряжений итерационными методами Якоби или Гаусса-Зейделя. ВСП состоит из пяти вычислительных модулей (ВМ)  $V(t^0)$ ,  $V(\wedge^0)$ ,

$V(tu_{2k0})$ ,  $V(tu_{3k0})$ ,  $V(tu_{4k0})$ . Состоянием позиций числового типа  $q$ ,  $q.LM$ ,  $q.lto$ ,  $q.ho$ ,  $q.gt \pm$ ,  $q.qo$ ,

$4u_{k0}$ ,  $4\backslash du_{l0}$ ,  $P^4$ ,  $P.XI$ ,  $P.3k0$ ,  $P.4k0$ ,  $P.5k0$ ,  $P.eL$  являются соответственно

$$K_{q,g} = i_{g0}(v_{p+1}), v(q, LM) = i_{LM}(v_{p+1}), \quad \quad \quad = J_{k0}(v_{p+1}) = \quad (8)$$

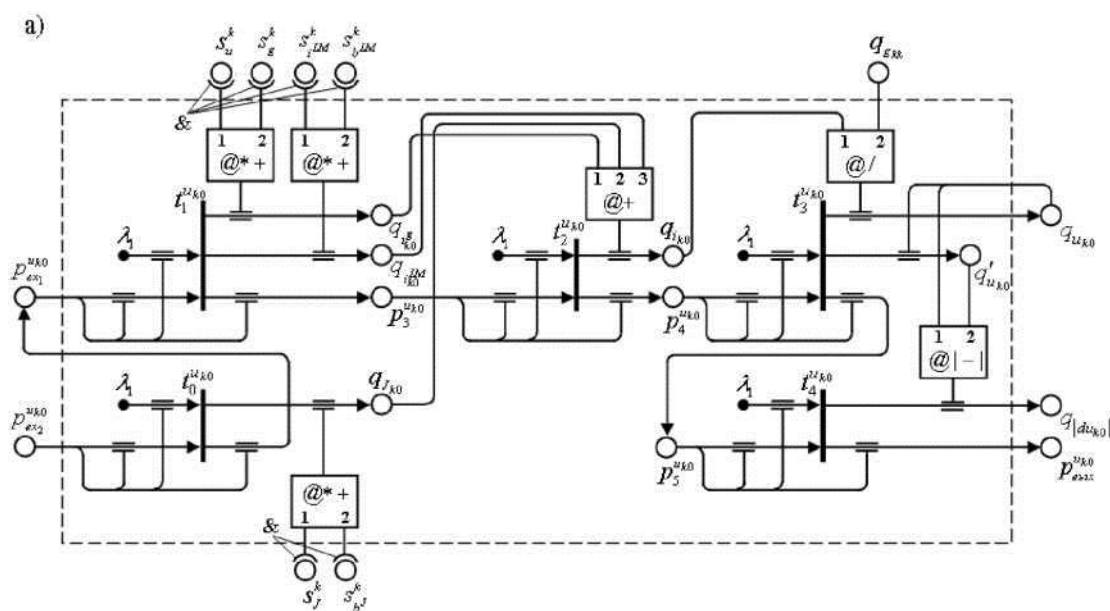
$\}k0$

$$n(q.hn) = i_{k0}(v_{p+1}), \wedge(q\&) = m^{\wedge}, M_{q^*} = u_{km+1}(v_{p+1}), M_{qL} = u_{km+1}(v_{p+1}) \quad (9)$$

$$M_{q^*j} = v(q.hn) - M_{qL} \quad \quad \quad u_{k0}(v_{p+1}) - u_{k^{\wedge}} \quad (10)$$

$$M_{p^{\wedge}X} M_{p^{\wedge}X} M_{P.3uk0}, n(P.uuk0), M(P.15k0); M_{pL} \in \{0, 1\}, \quad (11)$$

где  $m$  - номер шага итерации.





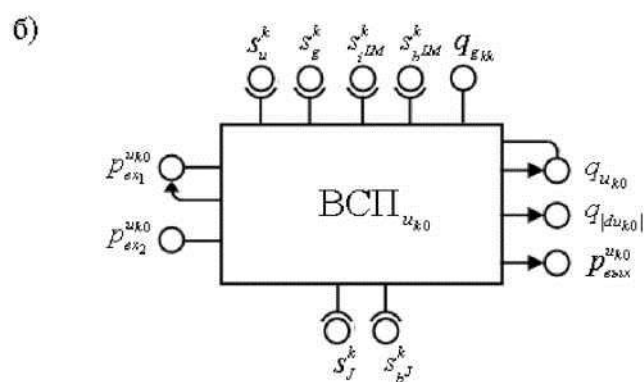


Рис. 2. ВСП для моделирования дискретной схемы замещения обобщенного узла J (а);  
условное обозначение (б)

Состоянием  $/u(sj), /u(sk), n(sk1M), fi(sjLM), /u(sj), Ju(sjj)$  позиций символического типа

$s_j, s_j, s_j$  являются соответствующим образом упорядоченными списками, элементы которых образуют набор имен позиций, а именно:

$$K(sk_j) \in K_o \setminus \{0\} \cup \{q_{ij} \in K_o \setminus \{0\}\}, \quad (12)$$

$$K(sg) \in \{q_{g,}, \setminus \{0\}\} \cup \{q_{gj} \in K_o \setminus \{0\}\}, \quad (13)$$

$$K(sjLM) \in \{q, \setminus \{0\}\} \cup \{q \in K_o \setminus \{0\}\}, \quad (14)$$

$$K(skbLM) \in \{bj \in K_o \setminus \{0\}\} \cup \{bj \in K_o \setminus \{0\}\}, \quad (15)$$

$$bij = p^+ \vee bji = p^- \vee erj -$$

$$K(sj) \in \{q_{jj} \in K_o \setminus \{0\}\} \cup \{q_{j,}, \setminus \{0\}\} \cup \{q_{j,}, \setminus \{0\}\} \quad (16)$$

$$K(skbj) = \{bj \in K_o \setminus \{0\}\} \cup \{bj \in K_o \setminus \{0\}\}, \quad (17)$$

$$bij = p^+ \vee eri0+, K = p^- \vee erj0$$

(18)

Состоянием позиций числового типа  $q, q$  выражений (12)-  
(17) являются соответственно

lg

(19)

u

(21)

$$Kqu, 0) = ui 0 (en+i), K(qg,) = gij, KqSu) = gu-.$$

$$Kq,) = ijKq,) = hi$$

$$ljiji$$

$$K(qjk) = Jil (^n), \quad K(qju) = Jjl (^n),$$

$$K(p+i) = +1, kO-O = -1$$

Эти позиции на рис. 2 не показаны.

Указатели  $\& sj$ ,  $\& s$ ,  $\& s]M$ ,  $\& sjLM$ ,  $\& s]$ ,  $\& sJJ$  по определению [3], указывают на позиции, имена которых записаны в  $s_k$ ,  $s$  образующих  $s_{LM}^j$   $s_k s_j s_j$ , в виде соответствующим упорядоченного списка (12)-(17), т.е.  $s$ . Т.е.

$$\& skj = K(skj), \& sl = Ksl), \& s]M = K(s]M),$$

$$\& S^jIm = K'(s^jLM), \& s^{\wedge} = K(sJ], \& s_{jj} = K(s_{jj}), \quad (22)$$

где & - операция макроподстановки, осуществляющая подстановку содержимого 's) памяти ^ указателя &s в качестве набора позиций вместо самого указателя.

Таким образом, выражения (8)-(22) дают интерпретацию позиций, используемых в ВСП для любого k-го узла электрической цепи.

Вычислительные элементы (ВЭ), из которых составлены ВМ ВСП% , выполняют

следующие функции: ВЭ  $V(tUk0, q\ g)$  - вычисление тока  $ig0$  (в ) по формуле (3); ВЭ

гk 0

$V(t'U0, q.iM)$  - вычисление тока  $iLM$  (#и+1) по формуле (4); ВЭ  $V(tUk0, qs)$  - вычисление тока  $ik0$  по формуле (5); ВЭ  $V(tUk0, qf)$  - вычисление тока  $ik0(вп+1)$  по формуле (2); ВЭ  $V(tlk0, qUla)$  - вычисление узлового напряжения  $и(m+1)(^1)$  по формуле (1) на t+1-ом шаге итерации; ВЭ  $V(tUk0, q')$  - для сохранения узлового напряжения и) вычисленного по формуле (1) на m-ом шаге итерации, в позиции  $q'^1$ ; ВЭ  $V(tUk0, q^1)$  - для вычисления

значения  $uk_i * >, i)$  - иктв)

используемого далее для проверки условия останова итерационного процесса для проверки готовности к вычислению узловых напряжений для модификации состояния позиций ВСП цепи; остальные ВЭ служат для управления последовательностью срабатывания ВМ

состояния  $uk_i * >, i)$  - иктв)

используемого далее для проверки условия останова итерационного процесса для проверки готовности к вычислению узловых напряжений для модификации состояния позиций ВСП цепи; остальные ВЭ служат для управления последовательностью срабатывания ВМ

состояние	ВЭ для проверки активности ВМ и модификации состояния	ВЭ для проверки активности ВМ и модификации состояния	ВЭ для проверки активности ВМ и модификации состояния	ВЭ для проверки активности ВМ и модификации состояния
1	2	3	4	5
1	$V(t^0Uk^0)$	$V(L, t^0Uk^0)$	$((L, tUk^0), (=, pUk^0))$	$y(tUk0) = 1$ при $'(pUk0^0) = L$ , и 0 в
		$V(pUk2^0, t^0Uk^0)$	$((C^0, qJio), (@*+, \& J, \& s^*))$	$'(P2^0) = '(P2^0) - '(pBX2^0)$
		$V(t^0Uk^0, pUki^0)$	$((t^0Uk^0, pUk0), (=, pUk0^0))$	$'(qj,,) = X'(xi) *'(y)$
				$xi e\&sJ Ji e\&Sj$
2	$v(tUk^0)$	$V(L, tUk^0)$	$((L, tik^0), (=, pUk^0))$	$y(tUk0) = 1$ при $'(pUk0) = L$ , и 0 в
		$V(tUk^0, qg)$	$((pU^0, 1^0), (=, Pik0))$	$m'(PuUk?) = '(PuUk?) - '(p^0)$
		$Ik0$	$Ik^0 *$	$ik0, x g\&s.$
		$V(tUk^0, q^AM)$	$((t1k^0, q.Lm), (@*+, \& si^*, \& s.lm)) Ik0 l b$	$"(q,LM) = S'(xi) *'(Ji)$
		$ik0$		$xi G\&s/kLM$
		$V(tUk^0, p.Uk^0)$	$((tUk^0, P3Uk^0), (=, pUk;))$	$m'(p3k0) = M(p3,k0) + '(pX)$



3			$((A, t^*0), (=, pU0))$	$^A(t^*0) = 1$ при $j_U(p^*0) = A$ , и 0 в прот.случ.
		$V(p^*0, tU^*0)$	$((pU^*0, t^*0), (=, pU0))$	$K(p^*0) = k(p^*0) - k(p^*0)$
		$V(tf \% q^*0)$	$(0^*0, q^*0), (@+, qih, qj^*0, q^A)$	$K(q,0) = K(q,g)+k(qj,0)+Kq,^{TM}$
		$v(t^* \setminus pU^*0)$	$((t^*0, p^*0), (=, pU0))$	$K(p4^*0) = Mp^*0)+k(p^*0)$
4	$V(t^*0)$	$v(A, t^*0)$	$((A, t^*0), (=, pU0))$	$\gamma(tll0) = 1$ при $k(p^*0) = A$ , и 0 в прот.случ.
		$v(p^*0, t^*0)$	$((pi^*0, tu^*0), (=, p4^*0))$	$K(p4^*0) = k(p^*0) - k(p4^*0)$
		$V(t^*0^A quj)$	$((t3u^*0, q40), (@/, q, 10, qgNe))$	$K(q^*k0) = K(q,^*0)/k(qg^{**})$
		$^A qU^*0)$	$((tf \% q'u^*0), (=t qu^*0))$	$K(q'ut0) = K(q^*0)+K(q^*0)$
		$V(t^*0, p^*0)$	$((tu^*0, pU0), (=, p^*0))$	$K(p5^*0) = Kp^*0)+K(p4't0)$
5	$V(tU^*0)$	$V(A, t^*0)$	$((A, t^*0), (=, pi^*0))$	$\gamma(110) = 1$ при $Kp^*0) = A$ , И 0 в прот.случ.
		$V(p^*0, t^*0)$	$((pi^*0, t4u^*0), (=, pU^*0))$	$K(p^*0) = k(p^*0) - k(p^*0)$
		$V(tU^* q \setminus u, l)$	$((t^*0, q^A0), (@l -1, qu^*0, q'ut$	$K(qdu0) = K(qu^*0 - K(ql^*0))$
		$V(tU^*0, pS)$	$((tf0, pUSX), (=, pU^*0))$	$K(pUSi) = KpS) + Kpi^*0)$

Заключение. Таким образом, в настоящей работе получены следующие результаты. для узлов дискретных схем замещения сложных электрических цепей разработаны соответствующие им схемы ВСП; приведены коды ВЭ, используемые совместно с кодами ВЭ ВСП для токов ветвей, приведенных в [1], для формирования структурированных (многокомпонентных) вычислительных алгоритмов.

Достоинствами предлагаемого в настоящей работе подхода являются:

возможность автоматизации формирования структурированных, легко интерпретируемых вычислительных алгоритмов;

возможность организации последовательно-параллельных вычислений, что существенно повышает быстродействие вычислительных процессов;

коды ВСП являются одновременно и моделью, и алгоритмом, и программой реализации на ЭВМ (см. таблицу) в среде программирования интеллектуальных систем структурного и логического анализа и моделирования, разрабатываемой в настоящее время на базе аппарата ВСП.

В дальнейшем планируется разработка: ВСП для нелинейных элементов электрических цепей; общей методики формирования вычислительных алгоритмов из ВСП типовых линейных и нелинейных элементов цепей при моделировании переходных процессов в цепях сложных электроэнергетических систем.

Список литературы

Асанова С.М. Вычислительные сети Петри для реализации дискретных схем замещения линейных элементов электрических цепей / С.М. Асанова. - Настоящий сборник.

Асанов М.С. Структурная модель вычислительных сетей / М.С. Асанов, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов.- Петри. -№13.Б.- 2008.-78-85с.

Валях Е. Последовательно-параллельные вычисления / Е. Валях М.: Мир, 1985. 456 с.

Известия КГТУ им. И. Раз.