

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ НАПРАВЛЕННЫХ ГРАФОВ

Для математического моделирования на ЭВМ переходных и установившихся процессов преобразовательных устройств используются направленные графы [1], так как структура графа является программой вычислений [2]. Вследствие того что исходная система интегрально-дифференциальных уравнений нелинейного устройства решается относительно любой из зависимых переменных, структура направленного графа неоднозначна. Анализ структуры графа позволяет определить, рациональна ли построенная на его основе расчетная схема. Изучение связей графа подсказывает пути изменения его структуры с целью получения оптимальной математической модели.

На примере утроителя частоты (рис. 1) иллюстрируется методика получения оптимальной структуры графа, обеспечивающей наилучшую сходимость итераций, т. е. наиболее экономичную, устойчивую расчетную схему. Получены критерии оценки графа с точки зрения оптимального математического моделирования на его основе.

В относительных единицах запишем основные уравнения утроителя:

$$\left. \begin{aligned} u_{ab} &= p(\psi_a - \psi_b) + Ri_a - Ri_b; & p\psi_a + p\psi_b + p\psi_c &= -R_{\text{H}} i_{\text{H}}; \\ u_{bc} &= p(\psi_b - \psi_c) + Ri_b - Ri_c; & i_a + i_{\text{H}} &= \text{sh} \psi_a; \\ u_{ca} &= p(\psi_c - \psi_a) + Ri_c - Ri_a; & i_b + i_{\text{H}} &= \text{sh} \psi_b; \\ i_a + i_b + i_c &= 0; & i_c + i_{\text{H}} &= \text{sh} \psi_c, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

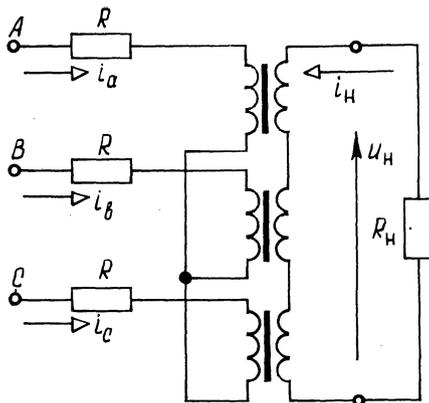
где p — оператор дифференцирования.

Решение каждого уравнения системы (1) относительно переменных $\psi_a, \psi_b, \psi_c, i_{\text{H}}, i_a, i_b, i_c$ приводит к графу (рис. 2, а).

Узловые сигналы графа (потокосцепления ψ_a, ψ_b, ψ_c) в первом приближении определяются путем интегрирования линейных напряжений. Коэффициенты передачи прямых ветвей имеют операторы интегрирования $1/p$ и дифференцирования p . Итерационные циклы образованы преимущественно ветвями с коэффициентами передачи, содержащими оператор интегрирования. Однако одна из трех обратных ветвей, определяющих потокосцепления, очень сильная, коэффициент передачи ее 1. Эта связь не входит в контур, ветви которого имели бы операторы интегрирования. Значит, в контуре не происходит накопления сигналов, и любое изменение одного из потокосцеплений вызывает резкое изменение второго. Далее, ток нагрузки i_{H} является результатом действия трех входящих ветвей и вычисляется путем дифференцирования узловых сигналов ψ_a, ψ_b, ψ_c . Резкие изменения потокосцеплений (за счет сильных обратных связей с передачами 1) вызывают сильные колебания сигнала i_{H} .

На основании проведенного анализа структуры графа следует, что расчет

Рис. 1. Принципиальная схема утрителя частоты



ная схема по графу (рис. 2, а) не обладает удовлетворительной устойчивостью. Характеристика итерационного процесса дана на рис. 2, а под графом.

Для улучшения расчетной схемы необходимо ослабить сильные обратные связи с передачами 1 и исключить операторы дифференцирования. Это достигается при решении системы уравнений (1):

$$\psi_a = \frac{u_{ab}}{2p} - \frac{R_n}{2p} i_n - \frac{\psi_c}{2} - \frac{R}{2p} i_a + \frac{R}{2p} i_b;$$

$$\psi_b = \frac{u_{bc}}{2p} - \frac{R_n}{2p} i_n - \frac{\psi_a}{2} - \frac{R}{2p} i_b + \frac{R}{2p} i_c;$$

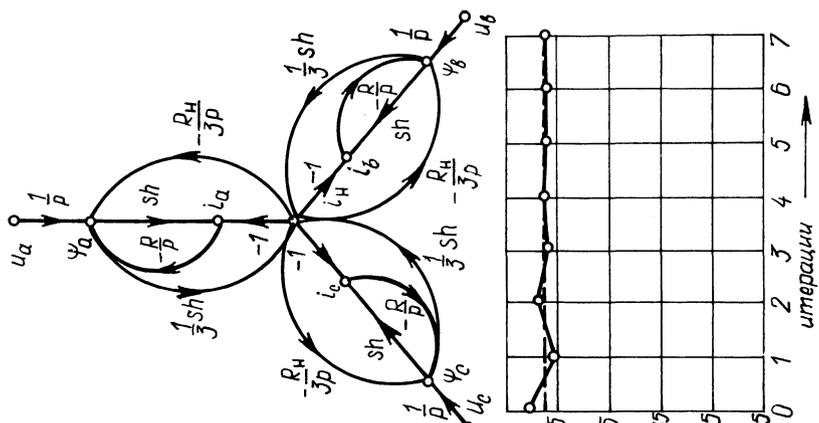
$$\psi_c = \frac{u_{ca}}{2p} - \frac{R_n}{2p} i_n - \frac{\psi_b}{2} - \frac{R}{2p} i_c + \frac{R}{2p} i_a;$$

$$i_n = \frac{1}{3} (\text{sh } \psi_a + \text{sh } \psi_b + \text{sh } \psi_c);$$

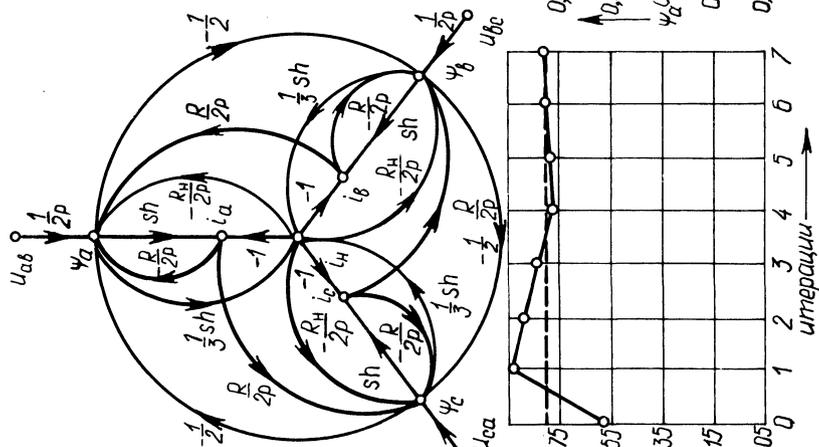
$$i_a = \text{sh } \psi_a - i_n; \quad i_b = \text{sh } \psi_b - i_n; \quad i_c = \text{sh } \psi_c - i_n.$$

Направленный граф, соответствующий этому решению, приведен на рис. 2, б. Операторы дифференцирования в коэффициентах передачи ветвей графа отсутствуют. За исключением двух ветвей, обратные связи каждой фазы осуществляются посредством интегрирования узловых сигналов. Ветви с передачей -1 не ухудшат устойчивость математической модели, так как эти ветви входят в контур, имеющий оператор интегрирования. Обратные связи, определяющие потокоосцепления, достаточно сильные (хотя и в меньшей степени, чем у графа рис. 2, а), коэффициент передачи ветвей $-1/2$. Характеристика сходимости итерационных циклов расчета по графу рис. 2, б изображена ниже данного графа. Итерационный процесс имеет замедленный характер: затухающие колебания возле истинного значения совершаются через две промежуточные точки. Такая расчетная схема нерациональна. Причиной плохой сходимости итераций являются обратные связи с передачами $-1/2$.

8



б



а

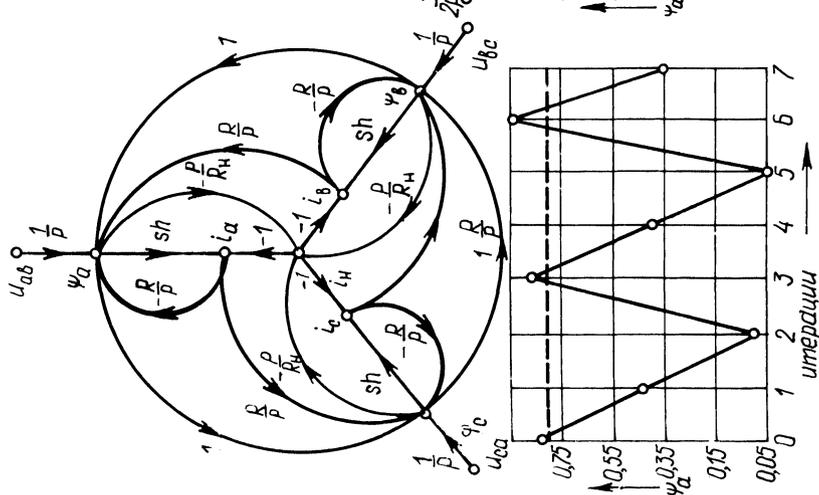


Рис. 2. Направленные графы устроителя и характеристики итерационного процесса

Для устранения сильных обратных связей преобразуем первые три уравнения системы (1) к виду:

$$\psi_a = \frac{u_a}{p} - \frac{R}{p} i_a - \frac{R_n}{3p} i_n; \quad \psi_b = \frac{u_b}{p} - \frac{R}{p} i_b - \frac{R_n}{3p} i_n,$$
$$\psi_c = \frac{u_c}{p} - \frac{R}{p} i_c - \frac{R_n}{3p} i_n.$$

Эти соотношения используем при построении графа рис. 2, в. Лишь три обратные ветви имеют коэффициенты -1 , но они не ухудшают устойчивость расчета, так как входят в контуры, коэффициенты передач ветвей которых содержат оператор интегрирования. Все остальные обратные передачи осуществляются с использованием операторов $1/p$. Приведенная ниже графа (рис. 2, в) характеристика итерационного процесса показывает, что процесс устанавливается быстро, три приближения дают достаточно точное решение.

Выполненные исследования показали, что наиболее рациональная расчетная схема обеспечивается при следующих особенностях структуры графа: 1) обратные связи графа отрицательны и содержат оператор интегрирования; 2) обратные связи без операторов интегрирования входят в контур, ветви которого имеют передачи с оператором интегрирования; 3) коэффициенты передач ветвей графа не содержат операторов дифференцирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. О р е О. Теория графов. — М.: Наука, 1968. — 352 с. 2. Р о з у м Т.Т. Исследования переходных процессов в двухконтурной феррорезонансной цепи с помощью направленных графов // Науч. и прикл. пробл. энергетики. Мн.: Выш. шк. — 1983. — Вып. 10. — С. 112–118.

УДК 62.83:621.313.333

Б.И. ФИРАГО, А.А. СЕМЧЕНКО,
С.Ю. ДОЛЖНИКОВ, Н.М. УЛАШИК

ПРИМЕНЕНИЕ НЕПОСРЕДСТВЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Достоинства асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором (АД) обусловили их широкое применение в самых различных механизмах. Особенно сильно выросла в последнее время область применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода, что, несомненно, связано с интенсивным развитием преобразовательной техники. Весьма перспективно применение в массовом электроприводе общепромышленных механизмов непосредственных полупроводниковых преобразователей частоты с естественной коммутацией (НППЧЕ). Эти преобразователи просты, надежны, обладают вы-