

УДК 621.311.001.57

В. В. Дабаров

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ И УСТРОЙСТВАМИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Современные методы расчёта реактивной мощности в системах электроснабжения (СЭС) с электродвигательной нагрузкой предполагают применение упрощённых эквивалентных электрических схем. При наличии переходных процессов в системе электроснабжения, вызванных изменением нагрузок электрических машин, использование распространенных методов становится проблематичным из-за возможности появления неконтролируемых погрешностей расчетов.

Естественным путем решения проблемы является использование интегрированных моделей СЭС. Например, интегрированная модель СЭС по [1] может включать в себя источник питания, асинхронные электродвигатели (АД), кабельные линии, шины и устройства коммутации, например, как на рис. 1. В рассматриваемой здесь математической модели СЭС дополнительно включены ёмкостные сопротивления устройств компенсации реактивной мощности.

Рассмотрим СЭС по рис. 1. Представим эту структуру в виде графа, в котором вершины — источники энергии, потребители, шины и устройства коммутации, а дуги — это кабели. Тогда при-

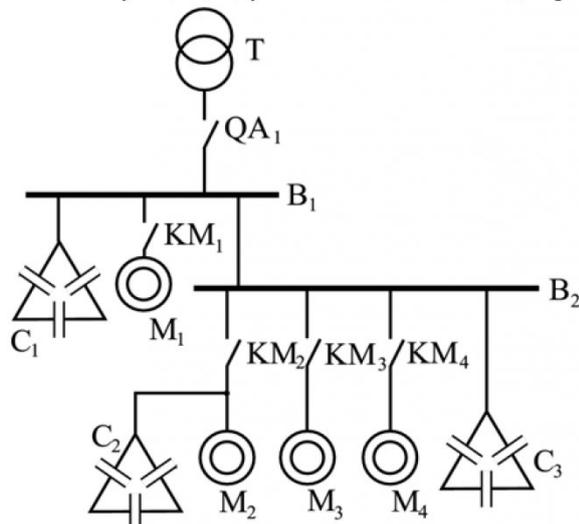


Рис. 2. Пример системы электроснабжения

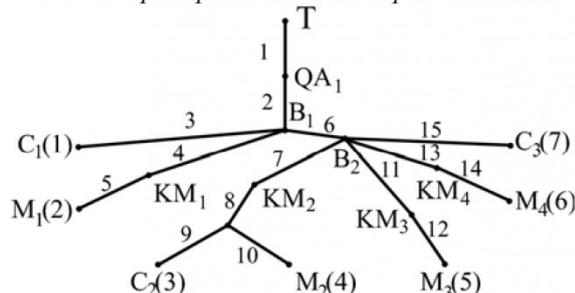


Рис. 2. СЭС, представленная в виде графа.

ведённая структура будет выглядеть, как на рис. 2, где все дуги пронумерованы произвольным образом, нагрузки в виде АД и устройства компенсации пронумерованы отдельно.

Процессы в нагрузках (АД, устройства компенсации) определяются характером изменений на них напряжений. Напряжение на каждой нагрузке, в том числе и на устройствах компенсации, может быть вычислено следующим образом:

$$u_{ak} = u_a - \sum_{i \in B_k} \left[ R_{ai} \sum_{j \in A_i} i_{aj} + L_{ai} \sum_{j \in A_i} \frac{di_{aj}}{dt} \right] \quad (1)$$

где  $\{B_k\}$  — множество кабельных участков, через которые питается  $k$ -ая нагрузка,  $\{A_i\}$  — множество нагрузок, которые питаются через  $i$ -ый кабель.

Для приведённого примера, например для двигателя  $M_2$  множество  $B_4$  в этом случае будет равно  $\{1;2;6;7;8;10\}$ , а для 6-го кабеля  $A_6$  равно  $\{3;4;5;6;7\}$ . Приведён пример только для фазы А, в других фазах напряжение вычисляется аналогично. В модели также учтён источник энергии ограниченной мощности.

Ниже приведена модель системы электроснабжения произвольной конфигурации с электродвигательной нагрузкой и устройствами компенсации реактивной мощности, с учётом кабельной сети, коммутационной аппаратуры и источника электроэнергии ограниченной мощности (для фазы А, для В, С — аналогично).

$$\begin{aligned} & (L_{Mk} + L_{sk}) \frac{d^2 i_{ak}}{dt^2} - \frac{1}{2} L_{Mk} \frac{d^2 i_{bk}}{dt^2} - \frac{1}{2} L_{Mk} \frac{d^2 i_{ck}}{dt^2} + \\ & + L_{Mk} \frac{d^2 i_{rak}}{dt^2} - \frac{1}{2} L_{Mk} \frac{d^2 i_{rbk}}{dt^2} - \frac{1}{2} L_{Mk} \frac{d^2 i_{rck}}{dt^2} + \\ & + \sum_{i \in B_k} \left( L_{ai} \sum_{j \in A_i} \frac{d^2 i_{aj}}{dt^2} \right) - \\ & - \left( L_{Mt} \frac{d^2 i_{1a}}{dt^2} - \frac{1}{2} L_{Mt} \frac{d^2 i_{1b}}{dt^2} - \frac{1}{2} L_{Mt} \frac{d^2 i_{1c}}{dt^2} \right) - \\ & - \sum_{i=1}^n \left( (L_{Mt} + L_2) \frac{d^2 i_{ai}}{dt^2} - \frac{1}{2} L_{Mt} \frac{d^2 i_{bi}}{dt^2} - \frac{1}{2} L_{Mt} \frac{d^2 i_{ci}}{dt^2} \right) = \\ & = R_2 \sum_{i=1}^n \frac{di_{ai}}{dt} - \sum_{i \in B_k} \left( \left( R_{ai} + \frac{dL_{ai}}{dt} \right) \times \right. \\ & \left. \sum_{j \in A_i} \left( \frac{di_{aj}}{dt} + \frac{dR_{ai}}{dt} i_{aj} \right) \right) - R_{sak} \frac{di_{ak}}{dt}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & L_{Mk} \frac{d^2 i_{ak}}{dt^2} - \frac{1}{2} L_{Mk} \frac{d^2 i_{bk}}{dt^2} - \frac{1}{2} L_{Mk} \frac{d^2 i_{ck}}{dt^2} + \\
 & + (L_{Mk} + L_{sk}) \frac{d^2 i_{rak}}{dt^2} - \frac{1}{2} L_{Mk} \frac{d^2 i_{rbk}}{dt^2} - \frac{1}{2} L_{Mk} \frac{d^2 i_{rck}}{dt^2} = \\
 & = -R_{rak} \frac{di_{rak}}{dt} - \frac{p_k \omega_k}{\sqrt{3}} \left[ \frac{3}{2} L_{Mk} \left( \frac{di_{sbk}}{dt} - \frac{di_{sck}}{dt} \right) + \right. \\
 & \left. + \left( \frac{3}{2} L_{Mk} + L_s \right) \left( \frac{di_{rbk}}{dt} - \frac{di_{rck}}{dt} \right) \right]; \\
 & (L_{Mt} + L_1) \frac{di_{1a}}{dt} - \frac{1}{2} L_{Mt} \frac{di_{1b}}{dt} - \frac{1}{2} L_{Mt} \frac{di_{1c}}{dt} + \\
 & + \frac{1}{2} L_{Mt} \sum_{i=1}^n \left( 2 \frac{di_{ai}}{dt} - \frac{di_{bi}}{dt} - \frac{di_{ci}}{dt} \right) = u_{1a} - R_1 i_{1a}; \\
 & M_{\text{элк}} = p_k \frac{\sqrt{3}}{2} L_{Mk} \left( (i_{ak} i_{rck} + i_{bk} i_{rak} + i_{ck} i_{rbk}) - \right. \\
 & \left. - (i_{ak} i_{rbk} + i_{bk} i_{rck} + i_{ck} i_{rak}) \right); \\
 & \sum_{j \in B_i} \left( L_{ai} \sum_{j \in A_i} \frac{d^2 i_{aj}}{dt^2} \right) = \frac{du_a}{dt} - \frac{i_{al}}{C_{al}} - \\
 & - \sum_{i \in B_j} \left( \left( R_{ai} + \frac{dL_{ai}}{dt} \right) \sum_{j \in A_i} \frac{di_{aj}}{dt} + \frac{dR_{ai}}{dt} \sum_{j \in A_i} i_{aj} \right), \quad (2)
 \end{aligned}$$

где  $i_{ak}, i_{bk}, i_{ck}$  - токи статора  $k$ -го двигателя в каждой фазе,  $i_{rak}, i_{rbk}, i_{rck}$  - токи ротора  $k$ -го двигателя,  $i_{al}, i_{bl}, i_{cl}$  - токи  $l$ -го устройства компенсации,  $u_a, u_b, u_c$  - напряжения вторичной обмотки каждой фазы трансформатора,  $u_{1a}, u_{1b}, u_{1c}$  - напряжения на первичной обмотке трансформатора,  $i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}$  - токи в первичной обмотке трансформатора,  $L_{Mk}$  - взаимная индуктивность обмоток  $k$ -го двигателя,  $L_{sk}$  - индуктивность обмоток статора  $k$ -го двигателя,  $R_k, R_r$  - активные сопротивления обмоток статора и ротора  $k$ -го двигателя,  $p_k$  - количество пар полюсов  $k$ -го двигателя,  $\omega_k$  - круговая скорость вращения ротора  $k$ -го двигателя,  $M_{\text{элк}}$  - электромагнитный момент  $k$ -го двигателя,  $L_i$  - индуктивность каждой фазы  $i$ -го кабеля,  $R_i$  - активное сопротивление каждой фазы  $i$ -го кабеля,  $L_{Mt}$  - взаимная индуктивность обмо-

ток трансформатора,  $R_1, L_1, R_2, L_2$  - активные сопротивления и индуктивности первичных и вторичных обмоток трансформатора соответственно,  $C_{al}, C_{bl}, C_{cl}$  - ёмкости каждой фазы  $l$ -го устройства компенсации,  $B_k$  - множество кабелей, через которые питается  $k$ -ый приёмник электроэнергии,  $A_i$  - множество приёмников, которые питаются через  $i$ -ый кабель,  $n$  - общее количество всех потребителей (в том числе и устройств компенсации).

Совокупность дифференциальных связей (2) реализована в виде прикладного программного

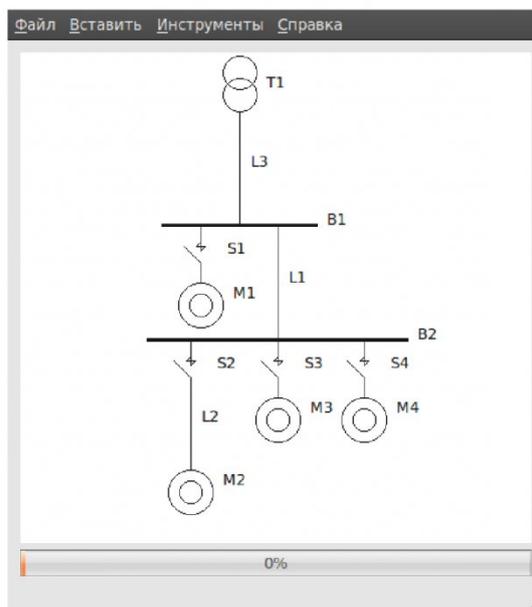


Рис. 3. Вариант без устройства компенсации

обеспечения для исследования процессов распространения энергий в СЭС. В качестве инструментария разработки был выбран язык C++ и кроссплатформенная свободная библиотека Qt версии 4. Вычислительная часть отделена от интерфейсной, она была написана на C++ без применения сторонних библиотек, интерфейс был реализован с помощью библиотеки Qt. Реализована технология drag & drop.

При помощи графического интерфейса производится выбор устройств, расположение их относительно друг друга и соединение их кабельными линиями, параметры которых тоже задаются. На основе введенных данных, программным образом

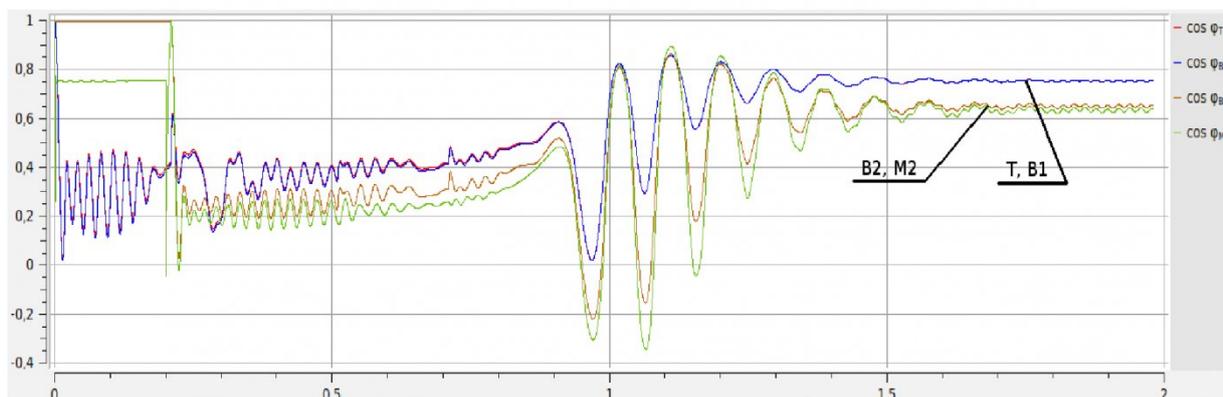


Рис. 4. Зависимость  $\cos \varphi$  для рис. 3

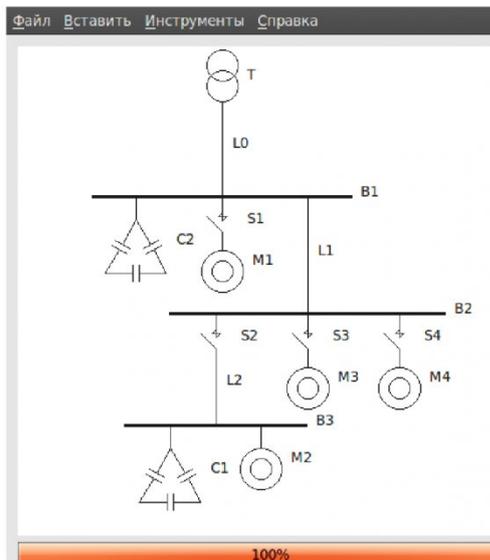


Рис. 5. Вариант с устройствами компенсации

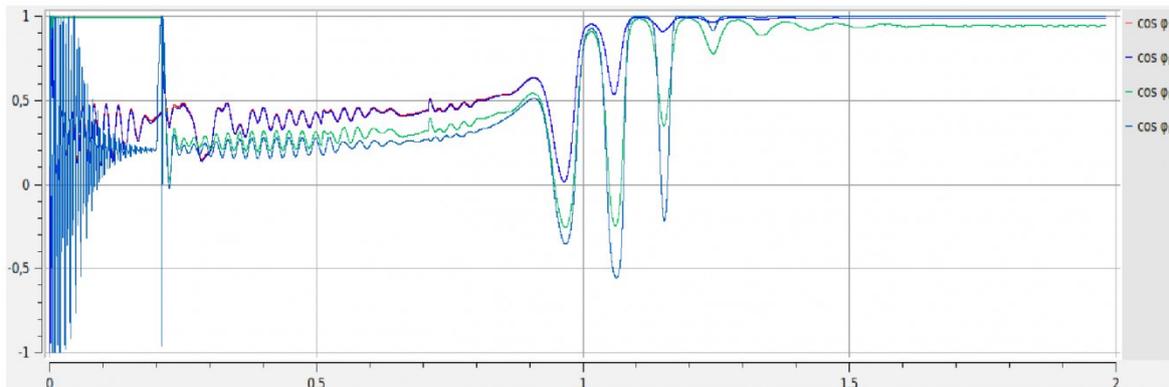


Рис. 6. Зависимость  $\cos \varphi$  для рис. 5

формируется система дифференциальных уравнений, которая решается методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

Рассмотрим простой пример моделирования, главное окно программы со схемой показано на рис. 3. На схеме изображена СЭС, содержащая

двигатели: М1 — ДКВ355LB4, мощностью 350 кВт, нагрузка — сухое трение 800 Н·м; М2 — ДКВ355L4, мощностью 350 кВт, нагрузка — вязкое трение 400 Н·м; М3 и М4 — ДКВ45, мощностью 45 кВт, вентиляторная нагрузка. Двигатели запускаются следующим образом: сначала М1, через 0,2 с — М2, через 0,5 с — М3, и через 0,7 с — М4. Параметры кабелей: L0 — АПВВГ 4x120, 40 м, L1 — АПВВГ 4x150, 200 м, L2 — АПВВГ 4x120, 100 м. Трансформатор — ТСВП-1000/6/1,2.

График зависимости  $\cos \varphi$  от времени показан на рис. 4.

Рассмотрим ту же схему с устройствами компенсации реактивной мощности (рис. 5). Ёмкости устройств компенсации составляют 200 мкФ и 195 мкФ для С1 и С2 соответственно. График зависимости  $\cos \varphi$  показан на рис. 6.

Как видно из результатов моделирования, снизилось потребление реактивной мощности. В си-

теме у трансформатора  $\cos \varphi$  был 0,75, после добавления устройств компенсации  $\cos \varphi$  стал равен 0,988. На шине В2 коэффициент мощности увеличился с 0,65 до 0,95.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указания по проектированию установок компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения промышленных предприятий. РТМ 36.18.32.6-92// Инструктивные и информационные материалы по проектированию электроустановок. - М.: ВНИПИ «Тяжпромэлекфпроект», 1993.- №2.-С.24-53.

2. Ещип Е.К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов моделирование и управление). Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т, 2003. -247 с.

3. Агунов А. В. Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах. СПб.: СпбМГТУ, 2009. 134 с.

4. Сулайманов А. О. Неактивная мощность и её составляющие в электроэнергетических системах: Кандидатская диссертация / Томский политехнический университет. Томск, 2009.

5. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.

□ Автор статьи:

Дабаров  
Владимир Викторович,  
аспирант каф. вычислительной техни-  
ки и информационных технологий  
КузГТУ, e-mail: dabarov@gmail.com.