

А. С. Сурмак, ассистент; И. Ф. Кузьмицкий, доцент

МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СМЕСИТЕЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА

In this article, the model of mixing of asphalt concrete components is proposed. The model of asynchronous motor in A,B,C – coordinates is presented. The model of operation of electric drive is proposed, allowing to intensify the process of mixing with constant energy loss per operation cycle, and to control the quality of mixing. Simulation of electric drive system is carried out in Matlab Simulink software.

При производстве асфальтобетонных смесей имеется проблема стабильности качества готового продукта. На качество асфальтобетона влияет большое количество факторов, в частности однородность получаемой смеси, которую можно оценивать по току, потребляемому приводным двигателем смесителя. Величина тока зависит от однородности получаемой смеси. При этом частота пульсаций переменной составляющей тока соответствует частоте вращения роторов смесителя. Удобно пользоваться огибающей выделенной переменной составляющей тока (рис. 1), по углу наклона которой можно предварительно определять завершение стадий приготовления асфальтобетонной смеси.

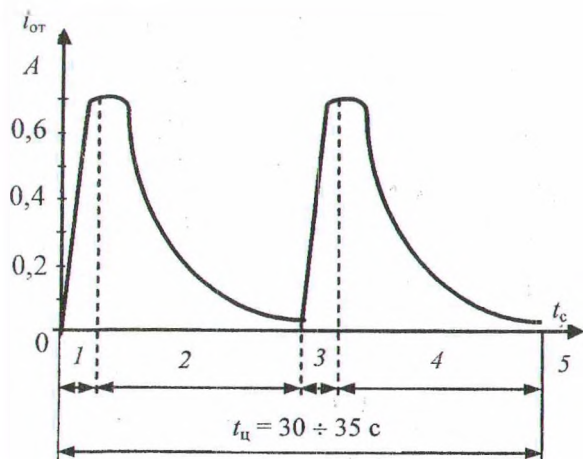


Рис. 1. График изменения огибающей переменной составляющей тока приводного двигателя смесителя за цикл приготовления асфальтобетона:
1 – дозирование минеральных материалов; 2 – сухое смешивание минеральных материалов;
3 – дозирование битума; 4 – влажное смешивание компонентов смеси; 5 – выгрузка асфальтобетонной смеси

На основе анализа асфальтобетонной смеси можно сделать вывод, что она обладает вязкими и упругими свойствами. Тогда модель асфальтобетона при смешивании его компонентов, т. е. при воздействии внешней силы, можно представить следующим образом (рис. 2). Будем считать, что m – масса смеси; Q – вязкость;

K – упругость, а F – внешняя сила. Дифференциальное уравнение движения в этом случае

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + Ky + Q \frac{dy}{dt} = F. \quad (1)$$

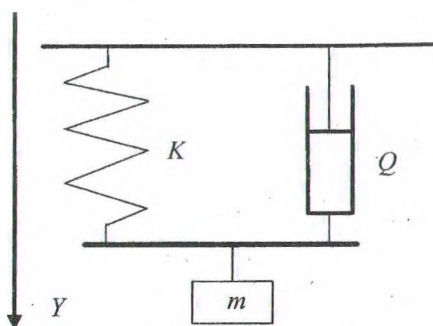


Рис. 2. Механическая модель асфальтобетона

Согласно [1] и [2] вязкость и упругость асфальтобетонной смеси в процессе ее приготовления изменяются в широких пределах и зависят от следующих факторов: температуры компонентов, марки битума и его количественного содержания, гранулометрического состава, времени смешивания. Примем, что температура смеси постоянна и соответствует требованиям ТУ.

Большинство моделей асинхронного двигателя (АД) записываются в двухфазных координатных осях. Но при несинусоидальном питающем напряжении модель АД в неподвижных осях α, β не отражает реальных пульсаций токов, электромагнитного момента и скорости трехфазного АД. Поэтому такие модели не представляется возможным использовать для описания процессов, происходящих в трехфазной машине. В [3] приведена трехфазная модель АД, записанная через потокосцепления и токи. Запишем уравнения электрического равновесия для трех фаз статора и ротора АД:

$$u_{1\alpha} = i_{1\alpha} R_1 + \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt}, \quad u_{1\beta} = i_{1\beta} R_1 + \frac{d\psi_{1\beta}}{dt};$$

$$u_{1\gamma} = i_{1\gamma} R_1 + \frac{d\psi_{1\gamma}}{dt};$$

$$0 = i'_{2\alpha} R'_2 + \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} + \frac{\omega_{2л} (\psi_{2\beta} - \psi_{2\gamma})}{\sqrt{3}};$$

$$0 = i'_{2\beta} R'_2 + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} + \frac{\omega_{\text{эл}} (\psi_{2\gamma} - \psi_{2\alpha})}{\sqrt{3}};$$

$$0 = i'_{2\gamma} R'_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + \frac{\omega_{\text{эл}} (\psi_{2\alpha} - \psi_{2\beta})}{\sqrt{3}};$$

где потокосцепления по координатным осям

$$\psi_{1\alpha} = L_{1\alpha} i_{1\alpha} - \frac{1}{2} L_{12} i_{1\beta} - \frac{1}{2} L_{12} i_{1\gamma} +$$

$$+ L_{12} \left(i'_{2\alpha} - \frac{i'_{2\beta}}{2} - \frac{i'_{2\gamma}}{2} \right);$$

$$\psi_{1\beta} = L_{1\beta} i_{1\beta} - \frac{1}{2} L_{12} i_{1\alpha} - \frac{1}{2} L_{12} i_{1\gamma} +$$

$$+ L_{12} \left(i'_{2\beta} - \frac{i'_{2\alpha}}{2} - \frac{i'_{2\gamma}}{2} \right);$$

$$\psi_{1\gamma} = L_{1\gamma} i_{1\gamma} - \frac{1}{2} L_{12} i_{1\alpha} - \frac{1}{2} L_{12} i_{1\beta} +$$

$$+ L_{12} \left(i'_{2\gamma} - \frac{i'_{2\alpha}}{2} - \frac{i'_{2\beta}}{2} \right);$$

$$\psi_{2\alpha} = L_{2\alpha} i'_{2\alpha} - \frac{1}{2} L_{12} i'_{2\beta} - \frac{1}{2} L_{12} i'_{2\gamma} +$$

$$+ L_{12} \left(i_{1\alpha} - \frac{i_{1\beta}}{2} - \frac{i_{1\gamma}}{2} \right);$$

$$\psi_{2\beta} = L_{2\beta} i'_{2\beta} - \frac{1}{2} L_{12} i'_{2\alpha} - \frac{1}{2} L_{12} i'_{2\gamma} +$$

$$+ L_{12} \left(i_{1\beta} - \frac{i_{1\alpha}}{2} - \frac{i_{1\gamma}}{2} \right);$$

$$\psi_{2\gamma} = L_{2\gamma} i'_{2\gamma} - \frac{1}{2} L_{12} i'_{2\alpha} - \frac{1}{2} L_{12} i'_{2\beta} +$$

$$+ L_{12} \left(i_{1\gamma} - \frac{i_{1\alpha}}{2} - \frac{i_{1\beta}}{2} \right);$$

$$L_{1\alpha} = L_{1\beta} = L_{1\gamma} = L_1 = L_{12} + L_{1\delta};$$

$$L_{2\alpha} = L_{2\beta} = L_{2\gamma} = L_2 = L_{12} + L_{2\delta}.$$

Здесь L_1, L_2 – собственные (полные) индуктивности статора и ротора; L_{12} – максимальная взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; $L_{1\alpha}, L_{2\alpha}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; $\omega_{\text{эл}}$ – угловая электрическая скорость ротора.

Электромагнитный момент трехфазного АД

$$M = p_n \frac{\sqrt{3}}{2} L_{12} \left[\left(i_{1\alpha} i'_{2\gamma} + i_{1\beta} i'_{2\alpha} + i_{1\gamma} i'_{2\beta} \right) + \right.$$

$$\left. + \left(i_{1\alpha} i'_{2\beta} + i_{1\beta} i'_{2\gamma} + i_{1\gamma} i'_{2\alpha} \right) \right].$$

Воспользоваться такой моделью невозможно, поскольку управление электроприводом смесителя осуществляется в функции токов статора АД. Поэтому необходимо получить модель АД, решенную относительно токов. После преобразований имеем

$$\frac{di_{1\alpha}}{dt} = K_1 (u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1) +$$

$$+ K_2 \omega_{\text{эл}} \left[m_1 (i_{1\beta} - i_{1\gamma}) + m_2 (i'_{2\beta} - i'_{2\gamma}) \right] + K_3 i'_{2\alpha};$$

$$\frac{di_{1\beta}}{dt} = K_1 (u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1) +$$

$$+ K_2 \omega_{\text{эл}} \left[m_1 (i_{1\gamma} - i_{1\alpha}) + m_2 (i'_{2\gamma} - i'_{2\alpha}) \right] + K_3 i'_{2\beta};$$

$$\frac{di_{1\gamma}}{dt} = K_1 (u_{1\gamma} - i_{1\gamma} R_1) +$$

$$+ K_2 \omega_{\text{эл}} \left[m_1 (i_{1\alpha} - i_{1\beta}) + m_2 (i'_{2\alpha} - i'_{2\beta}) \right] + K_3 i'_{2\gamma};$$

$$\frac{di'_{2\alpha}}{dt} = -K_4 (u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1) -$$

$$- K_6 \omega_{\text{эл}} \left[m_1 (i_{1\beta} - i_{1\gamma}) + m_2 (i'_{2\beta} - i'_{2\gamma}) \right] - K_5 i'_{2\alpha};$$

$$\frac{di'_{2\beta}}{dt} = -K_4 (u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1) -$$

$$- K_6 \omega_{\text{эл}} \left[m_1 (i_{1\gamma} - i_{1\alpha}) + m_2 (i'_{2\gamma} - i'_{2\alpha}) \right] - K_5 i'_{2\beta};$$

$$\frac{di'_{2\gamma}}{dt} = -K_4 (u_{1\gamma} - i_{1\gamma} R_1) -$$

$$- K_6 \omega_{\text{эл}} \left[m_1 (i_{1\alpha} - i_{1\beta}) + m_2 (i'_{2\alpha} - i'_{2\beta}) \right] - K_5 i'_{2\gamma};$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{K_7 \left[\left(i_{1\alpha} i'_{2\gamma} + i_{1\beta} i'_{2\alpha} + i_{1\gamma} i'_{2\beta} \right) - \right.}{J} - M_e$$

$$\left. - \left(i_{1\alpha} i'_{2\beta} + i_{1\beta} i'_{2\gamma} + i_{1\gamma} i'_{2\alpha} \right) \right].$$

$$\text{где } K_1 = \frac{1}{L_{1\alpha}}; K_2 = \frac{b_1}{L_{1\alpha}}; K_3 = \frac{b_1 R'_2}{L_{1\alpha}};$$

$$K_4 = \frac{3}{2} \frac{L_{12}}{L_{1\alpha} L_{2\alpha}}; K_5 = \frac{R'_2}{L_{2\alpha}} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{b_1 L_{12}}{L_{1\alpha}} \right);$$

$$K_6 = \frac{1}{L_{2\alpha}} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{b_1 L_{12}}{L_{1\alpha}} \right); K_7 = \frac{\sqrt{3}}{2} p_n L_{12};$$

$$L_{1\alpha} = L_{1\delta} + b_3 L_{2\delta}; b_1 = \frac{3L_{12}}{2L_{2\delta} + 3L_{12}};$$

$$L_{2\alpha} = L_{2\delta} + \frac{3L_{12}}{2}; m_1 = \frac{3L_1}{2\sqrt{3}}; m_2 = \frac{L_2}{\sqrt{3}} + \frac{3L_{12}}{2\sqrt{3}}.$$

Предлагается следующий алгоритм работы электропривода. Для снижения ударных нагрузок на роторы смесителя дозирование каменных материалов происходит при пониженной на 30% относительно номинальной скорости. Затем по линейному закону увеличивается скорость вплоть до номинальной. Как только ток, потребляемый двигателем, начинает снижаться, происходит пропорциональное увеличение скорости, но не более чем на 10% от номинальной, поскольку большее увеличение скорости приведет к резкому увеличению сопротивления вращению.

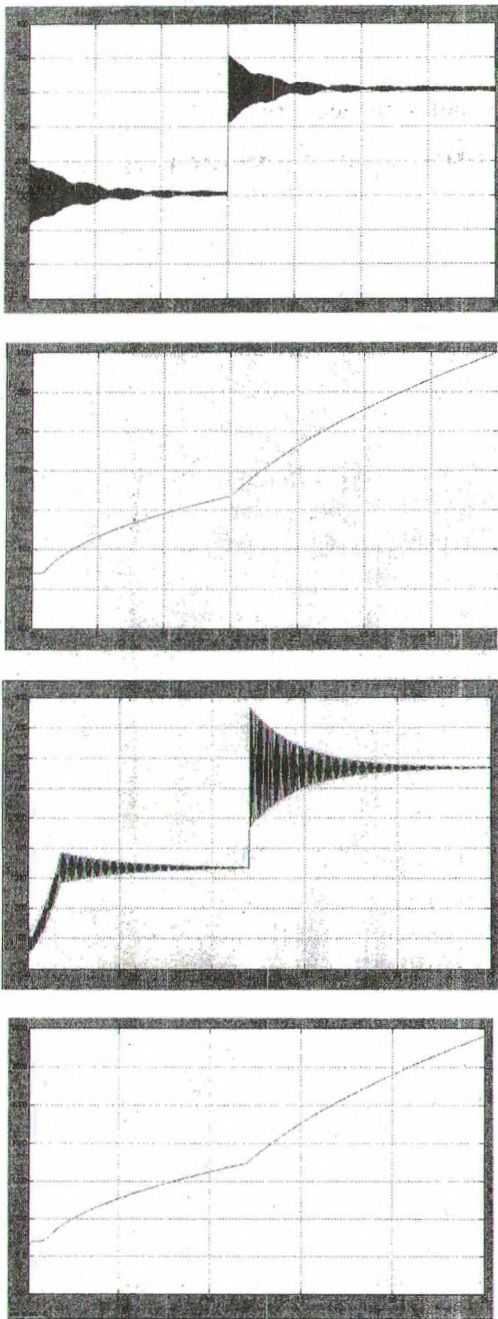


Рис. 3. Графики момента и потерь двигателя за цикл смешивания при номинальной и повышенной на 10% скорости соответственно

Кроме этого, необходимо учитывать тот факт, что дальнейшее увеличение скорости происходит за счет ослабления магнитного потока машины. Следовательно, ее перегрузочная способность снижается и происходит переход в режим работы с большими значениями

скольжения, что приводит к росту потерь. Как только производная огибающей тока фазы двигателя $\frac{di_{\text{от}}}{dt} = 0$ (что свидетельствует о достаточной однородности), происходит либо дозирование битума, либо выгрузка готовой смеси.

С целью оценки эффективности приведенного выше алгоритма было произведено моделирование работы электропривода смесителя в процессе смешивания компонентов асфальтобетона в среде MATLAB 6.5 (приложение Simulink). Основные параметры режима смешивания (время смешивания, частота вращения роторов смесителя, масса замеса) соответствуют установке ДС-158. В качестве приводного двигателя используется асинхронная машина 4А200М4УЗ со следующими номинальными данными: $P_{\text{ном}} = 37$ кВт, $n_0 = 750$ об/мин, $s_{\text{ном}} = 2,8\%$; $s_k = 19,5\%$; $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,9$. По известным номинальным данным двигателя были рассчитаны параметры схемы замещения фазы двигателя, а по приведенным выше соотношениям – параметры структурной схемы АД. Параметры модели асфальтобетона, такие, как массы минеральных материалов и масса битума, динамическая вязкость, были определены по [1] для ШМСц № 5 со следующим составом: щебень – 65%; каменный отсев – 25%; минеральный порошок – 10%; битум марки БНД 90/130 – 6,4%. Величина упругости смеси была рассчитана для установившегося режима смешивания на постоянной скорости вращения роторов.

Литература

1. Бочаров В. С. Битумосодержащие породы в дорожном строительстве. Технология и механизация. – М.: Транспорт, 1987. – 191 с.
2. Марышев Б. С., Бочаров В. С., Шулькин А. И. Интенсификация процесса перемешивания асфальтобетонной смеси на основе битумосодержащих пород. Повышение качества строительства асфальтобетонных и черных покрытий // Труды Союздорнии. – М., 1988.
3. Теория электропривода: Учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Мн.: ЗАО «Техноперспектива», 2004. – 527 с.