

УДК 621.311

А. В. Шестаков

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РЕЖИМА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ РЕАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ НА ЕЕ ПАРАМЕТРЫ

Работа асинхронных двигателей (АД) в пульсирующем режиме находит весьма широкое применение в управляемых электроприводах. Поэтому для оптимизации процесса проектирования пульсирующего асинхронного электропривода актуальной становится задача разработки математических моделей пульсирующего режима АД, учитывающих реальные факторы. В предлагаемой статье приводится описание математических моделей процессов управления АД, работающего в пульсирующем режиме, при различных законах управления. Приводятся результаты моделирования переходных процессов в АД с учетом влияния вытеснения тока в обмотках короткозамкнутого ротора, насыщения магнитной системы, угла магнитного запаздывания на параметры схемы замещения АД, и выполняется сопоставление этих результатов с данными, полученными без учета названных факторов. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что реальные факторы оказывают значительное влияние на динамические характеристики АД, работающего в пульсирующем режиме, и учет этих факторов необходим при исследовании и проектировании пульсирующих асинхронных электроприводов.

Ключевые слова – процессы управления; асинхронный двигатель; пульсирующий режим; математическое моделирование; влияние насыщения; вытеснение тока в обмотках ротора; угол магнитного запаздывания.

Пульсирующий режим электропривода (то есть работа с поворотом выходного вала и возвратом в исходное положение) находит широкое применение в приводах антенн радиолокаторов, в медицине, горной и химической промышленности [1, 2, 3]. Развитие электроники и систем управления, создание преобразователей частоты позволяет использовать в

электроприводе пульсирующего движения асинхронные машины, что дает возможность отказаться от механической передачи и повысить надежность и точность привода. В связи с этим становится актуальной задача разработки математических моделей АМ, работающей в пульсирующем режиме при различных законах управления. Эти модели позволяют оценить динамические и энергетические показатели АМ на стадии проектирования электроприводов пульсирующего движения.

Целями наших исследований являются создание математической модели и программного обеспечения, позволяющего моделировать переходные процессы в АМ при различных законах управления в пульсирующем режиме с учетом реальных факторов (насыщения магнитной системы, вытеснения тока, угла магнитного запаздывания), выполнение расчетов с помощью разработанной программы и сопоставление с результатами моделирования без учета названных факторов для оценки влияния реальных факторов и различных частот и величин питающего напряжения на динамические характеристики и токи АМ в пульсирующем режиме.

В [3] приведено математическое описание АМ, работающей в пульсирующем режиме. Данная модель основана на системе дифференциальных уравнений АМ с короткозамкнутым ротором в координатах α , β , связанных со статором, и записана для токов в предположении, что параметры схемы замещения – постоянны, то есть не зависят от токов и потокосцеплений обмоток. Пульсирующий режим работы АМ может быть создан следующими способами [3]:

- потенциальной линейно-фазовой (фазовой) модуляцией, когда на обмотки статора АМ подаются следующие напряжения

$$\begin{aligned} u_{\alpha s} &= U_{1m} (\cos \omega_1 t) \cdot A(t); \\ u_{\beta s} &= U_{2m} (\sin \omega_2 t + \alpha), \end{aligned} \quad (1)$$

где $u_{\alpha s}$, $u_{\beta s}$ – мгновенные значения напряжений на обмотках статора по осям α и β , соответственно, U_{1m} , U_{2m} – амплитуды питающих напряжений, ω_1 и ω_2 – круговые частоты питающих напряжений, α – начальная фаза напряжения обмотки по оси β ;

- потенциальной балансно-амплитудной (амплитудной), когда на статорные обмотки АМ подаются напряжения

$$\begin{aligned} u_{\alpha s} &= U_{1m} (\sin \omega_1 t) \cdot \cos \Omega t; \\ u_{\beta s} &= U_{2m} (\cos \omega_1 t) \cdot A(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где Ω – циклическая частота пульсаций, равная $\Omega = \omega_1 - \omega_2$.

В (1) и (2) функция $A(t)$ равна:

$$A(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } \Omega t > 0, \\ 0, & \text{если } \Omega t \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Предлагаемая нами модель АМ с короткозамкнутым ротором [4] базируется на системе дифференциальных уравнений в координатах α , β , связанных со статором, учитывает влияние насыщения, потерь в стали и вытеснения тока и выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} &= U_{1m} \cdot \sin \omega_1 t - R_s \cdot (b_{11} \cdot \psi_{\alpha s} + b_{12} \cdot \psi_{\alpha r} + b_{13} \cdot \psi_{\beta s} + b_{14} \cdot \psi_{\beta r}); \\ \frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} &= -R_{r\xi} \cdot \left(b_{21} \cdot \psi_{\alpha s} + b_{22} \cdot \psi_{\alpha r} + b_{23} \cdot \psi_{\beta s} + \left(b_{24} + \frac{\omega_r}{R_{r\xi}} \right) \cdot \psi_{\beta r} \right); \\ \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} &= U_{1m} \cdot \cos \omega_1 t - R_s \cdot (b_{31} \cdot \psi_{\alpha s} + b_{32} \cdot \psi_{\alpha r} + b_{33} \cdot \psi_{\beta s} + b_{34} \cdot \psi_{\beta r}); \\ \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} &= -R_{r\xi} \cdot \left(b_{41} \cdot \psi_{\alpha s} + \left(b_{42} - \frac{\omega_r}{R_{r\xi}} \right) \cdot \psi_{\alpha r} + b_{43} \cdot \psi_{\beta s} + b_{44} \cdot \psi_{\beta r} \right); \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{p}{J} \cdot (M_{\text{эм}} - M_0 - M_C); \\ \frac{d\gamma_r}{dt} &= \omega_r, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где $\psi_{\alpha s}, \psi_{\alpha r}, \psi_{\beta s}, \psi_{\beta r}$ – полные потокосцепления статора и ротора по оси α , статора и ротора по оси β ; $i_{\alpha s}, i_{\alpha r}, i_{\beta s}, i_{\beta r}$ – токи соответствующих обмоток; R_s – активное сопротивление статора; $R_{r\xi}$ – активное сопротивление ротора с учетом вытеснения тока; $b_{11} - b_{44}$ – коэффициенты обратной матрицы индуктивностей $\|B\|$; ω_r – угловая скорость ротора; J – приведенный момент инерции ротора и нагрузочного механизма; $M_{эм} = \frac{pm_1}{2}(\psi_{\alpha s}i_{\beta s} - \psi_{\beta s}i_{\alpha s})$ – электромагнитный момент АМ; M_C – момент сопротивления нагрузочного механизма на валу АД; p – число пар полюсов АМ, γ_r – угол поворота ротора. M_0 – момент холостого хода, обусловленный потерями трения в подшипниках $P_{TP, ПОД}$, добавочными потерями в стали (поверхностными и пульсационными) $P_{ДОБ}$ и вентиляционными потерями $P_{TP, ВЕН}$,

$$M_0 = \frac{P_{TP, ПОД}}{\omega_{r, НОМ}} + \frac{P_{ДОБ} \cdot s^{1,5}}{\omega_{r, НОМ}} + \frac{P_{TP, ВЕН} \cdot \omega_r^2}{\omega_{r, НОМ}^2}, \quad (5)$$

$\omega_{r, НОМ}$ – номинальная угловая скорость ротора.

В результате решения системы (4) находятся значения потокосцеплений всех обмоток, токи, электромагнитный момент, частота вращения и скольжение ротора АМ.

Обратная матрица индуктивностей для (4) равна $\|B\| = \|M^{-1}\|$, где исходная матрица индуктивностей равна:

$$\|M\| = \begin{vmatrix} L_{s, HC}; & M_{HC}; & -M_{\alpha\beta, HC}; & -M_{\alpha\beta, HC}; \\ M_{HC}; & L_{r\xi, HC}; & -M_{\alpha\beta, HC}; & -M_{\alpha\beta, HC}; \\ M_{\alpha\beta, HC}; & M_{\alpha\beta, HC}; & L_{s, HC}; & M_{HC}; \\ M_{\alpha\beta, HC}; & M_{\alpha\beta, HC}; & M_{HC}; & L_{r\xi, HC}. \end{vmatrix} \quad (6)$$

В (6) $L_{s,HC} = l_{s,нас} + M_{HC}$ – полная индуктивность статора с учетом влияния насыщения коронок зубцов; $L_{r\xi,HC} = l_{r\xi,нас} + M_{HC}$ – полная индуктивность ротора с учетом влияния насыщения коронок зубцов и вытеснения тока в стержнях ротора; M_{HC} – взаимная индуктивность с учетом насыщения и угла магнитного запаздывания γ ; $M_{\alpha\beta,HC}$ – взаимно-индуктивная составляющая, учитывающая влияние полей по осям α и β друг на друга при насыщении и появлении угла магнитного запаздывания.

Учет влияния вытеснения тока в стержнях короткозамкнутого ротора на активное сопротивление и индуктивность рассеяния ротора, а также влияние потоков рассеяния на индуктивности рассеяния статора и ротора ведется по известным методикам [5], [6].

Взаимная индуктивность для (6) с учетом насыщения и угла магнитного запаздывания γ , возникающего между МДС и индукцией вследствие потерь в стали, равна:

$$M_{HC} = \frac{M \cdot \cos \gamma}{k_\mu}, \quad (7)$$

где M – взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора; угол магнитного запаздывания [4] равен

$$\gamma = \arctg \left(\frac{P_C}{P_{эм}} \right), \quad (8)$$

P_C – потери в стали, $P_{эм}$ – значение мощности, идущей на изменение электромагнитной энергии асинхронной машины.

Для определения коэффициента насыщения магнитной цепи k_μ кривую намагничивания АМ Φ_δ и $B_\delta = f(I_{0P})$, где I_{0P} – реактивная составляющая тока холостого хода, можно представить в виде двух участков – линейного, аппроксимируемого отрезком прямой, и нелинейного, аппроксимируемого функцией арктангенса.

При численном решении системы (4) для каждого момента времени ток I_{0P} приближенно определяется:

$$I_{0P} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(i_{\alpha s} + i_{\alpha r})^2 + (i_{\beta s} + i_{\beta r})^2}. \quad (9)$$

Влияние друг на друга контуров, расположенных ортогонально, учитывается введением дополнительной взаимной индуктивности между осями α и β :

$$M_{\alpha\beta, HC} = M \cdot \frac{\sin \gamma + \xi_{\alpha\beta}}{k_{\mu}}, \quad (10)$$

где $\xi_{\alpha\beta}$ – критериальный коэффициент, учитывающий взаимное влияние полей по осям α и β друг на друга при насыщении [4].

На основании уравнений (4) – (10) была составлена программа в среде Qbasic, позволяющая моделировать переходные процессы в асинхронной машине при различных способах формирования сигналов управления в соответствии с (1) – (3).

По составленной программе были выполнены расчеты пульсирующих режимов АМ при фазовой и амплитудной модуляции при синусоидальном напряжении сети для двигателя АИР56А2УЗ для различных значений амплитуд и частот напряжений, питающих обмотки статора. Также выполнялись расчеты тех же режимов по программе без учета насыщения, угла магнитного запаздывания и вытеснения тока, составленной в соответствии с [3].

Номинальные данные исследуемого асинхронного двигателя: полезная мощность $P_{2ном} = 0,180 \text{ кВт}$; синхронная частота вращения $n_1 = 3000 \text{ мин}^{-1}$; напряжение фазы статора $U_{1ном} = 220 \text{ В}$; активное сопротивление обмотки статора $R_1 = 51,03 \text{ Ом}$; индуктивное сопротивление обмотки статора $X_1 = 25,506 \text{ Ом}$; приведенное активное сопротивление обмотки ротора $R_2' = 31,95 \text{ Ом}$; приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора $X_2' = 29,85 \text{ Ом}$; сопротивление взаимной индукции в ненасыщенном состоянии

$X_{12} = 779 \text{ Ом}$; основные потери в стали статора $P_{с,осн} = 4,33 \text{ Вт}$; добавочные потери в стали статора $P_{1нул} + P_{1нов} = 1,01 \text{ Вт}$; добавочные потери в стали ротора $P_{2нул} + P_{2нов} = 1,74 \text{ Вт}$; основные потери в магнитопроводе ротора, рассчитанные при скольжении, равном единице, $P_{ср,осн} = 7,07 \text{ Вт}$; механические потери $P_{мех} = 5,64 \text{ Вт}$; момент инерции ротора $J = 0,00033 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Моделирование процессов в АМ при фазовой и амплитудной модуляции выполнялось при следующих параметрах питающих напряжений:

- $f_1 = 52 \text{ Гц}$, $f_2 = 50 \text{ Гц}$, $U_1 = U_2 = 220 \text{ В}$, частота пульсаций $f_{\Pi} = 2 \text{ Гц}$;
- $f_1 = 12 \text{ Гц}$, $f_2 = 10 \text{ Гц}$, $U_1 = U_2 = 55 \text{ В}$, частота пульсаций $f_{\Pi} = 2 \text{ Гц}$.

Во всех случаях предполагалось, что начальная фаза напряжения по оси β была равна нулю. Момент сопротивления нагрузки был принят пропорциональным угловой скорости ротора, и равным $M_C = 0,3 \cdot \omega_r$.

На рис. 1 – рис. 20 приведены результаты моделирования пульсирующего режима асинхронной машины АИР56А2У3 для различных способов модуляции и параметрах питающего напряжения. Сплошными линиями показаны результаты расчетов по модели, не учитывающей реальные факторы [3], а пунктирными линиями – по нашей модели, с учетом насыщения, вытеснения тока и угла магнитного запаздывания.

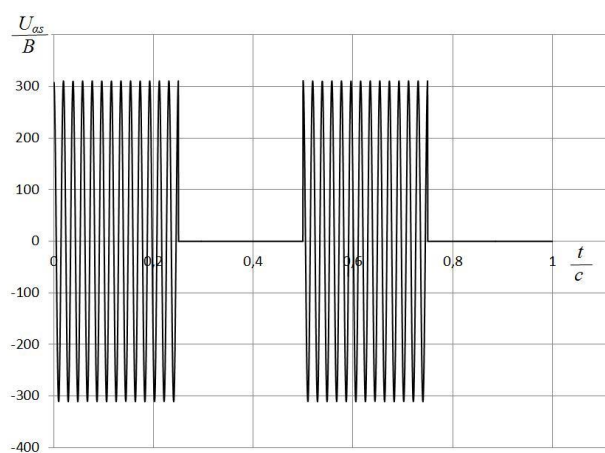


Рис. 1. Напряжение статорной обмотки по оси α при фазовой модуляции с $U_1 = U_2 = 220 \text{ В}$, $f_1 = 52 \text{ Гц}$, $f_2 = 50 \text{ Гц}$

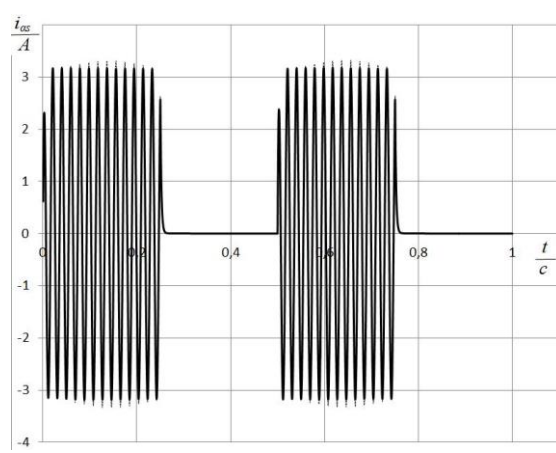


Рис. 2. Ток статорной обмотки по оси α при фазовой модуляции с $U_1 = U_2 = 220 \text{ В}$, $f_1 = 52 \text{ Гц}$, $f_2 = 50 \text{ Гц}$

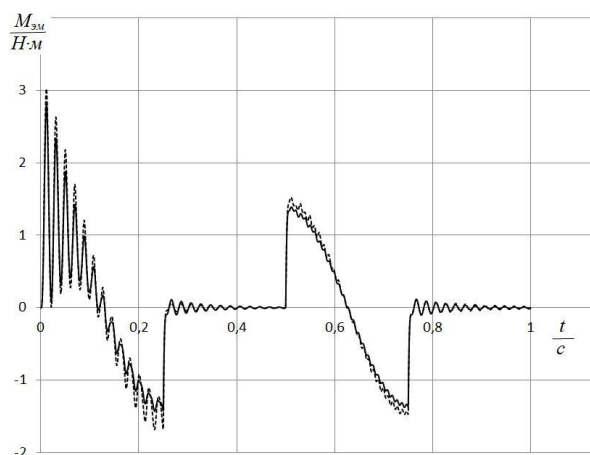


Рис. 3. Электромагнитный момент при фазовой модуляции с $U_1 = U_2 = 220 \text{ В}$, $f_1 = 52 \text{ Гц}$, $f_2 = 50 \text{ Гц}$

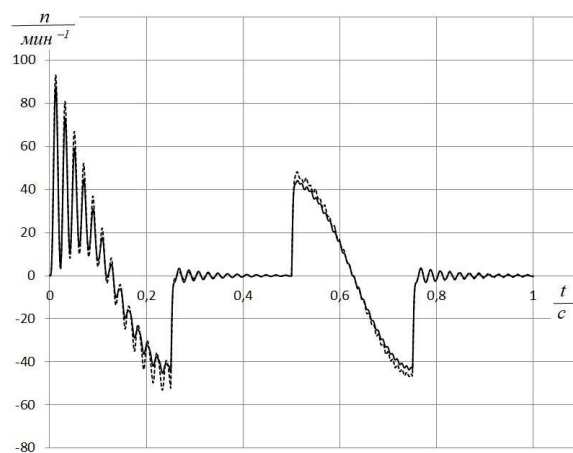


Рис. 4. Частота вращения при фазовой модуляции с $U_1 = U_2 = 220 \text{ В}$, $f_1 = 52 \text{ Гц}$, $f_2 = 50 \text{ Гц}$

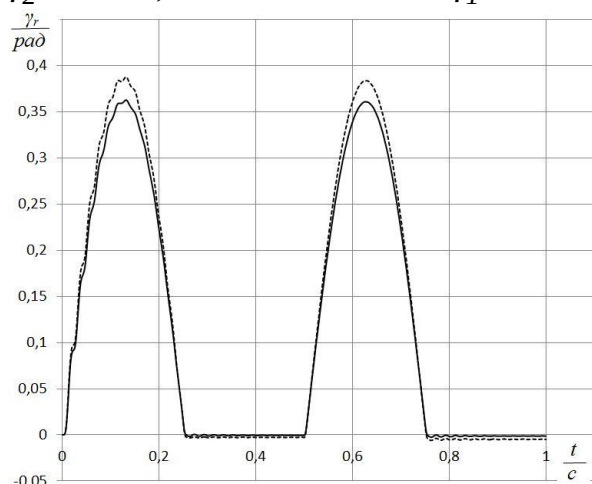


Рис. 5. Угол поворота ротора при фазовой модуляции с $U_1 = U_2 = 220 \text{ В}$, $f_1 = 52 \text{ Гц}$, $f_2 = 50 \text{ Гц}$

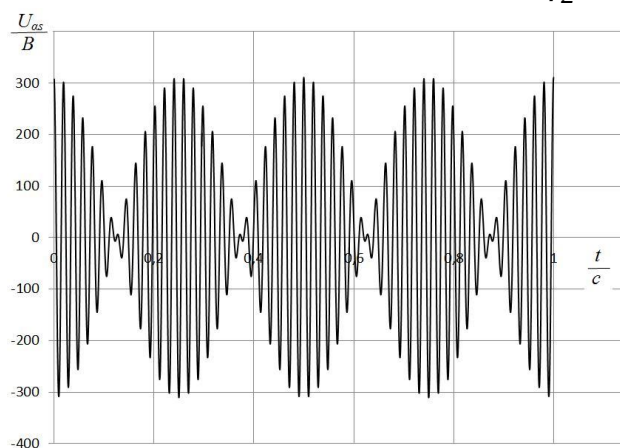


Рис. 6. Напряжение статорной обмотки по оси α при амплитудной модуляции с $U_1 = U_2 = 220 \text{ В}$, $f_1 = 52 \text{ Гц}$, $f_2 = 50 \text{ Гц}$

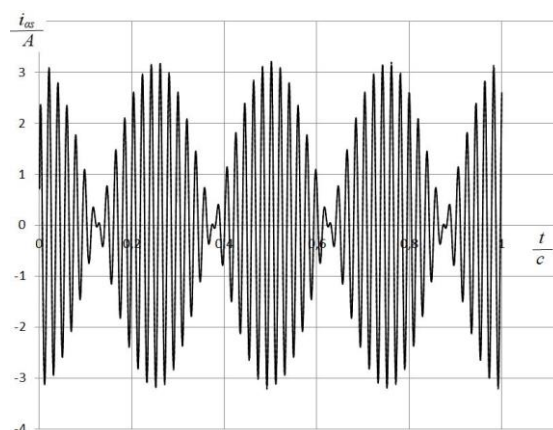


Рис. 7. Ток статорной обмотки по оси α при амплитудной модуляции с $U_1 = U_2 = 220 \text{ В}$, $f_1 = 52 \text{ Гц}$, $f_2 = 50 \text{ Гц}$

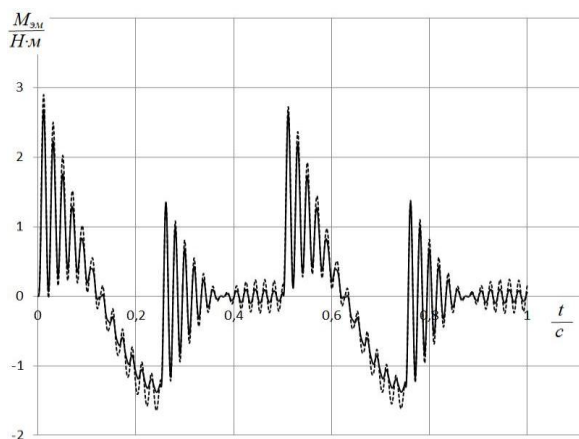


Рис. 8. Электромагнитный момент при амплитудной модуляции с $U_1 = U_2 = 220 \text{ В}$, $f_1 = 52 \text{ Гц}$, $f_2 = 50 \text{ Гц}$

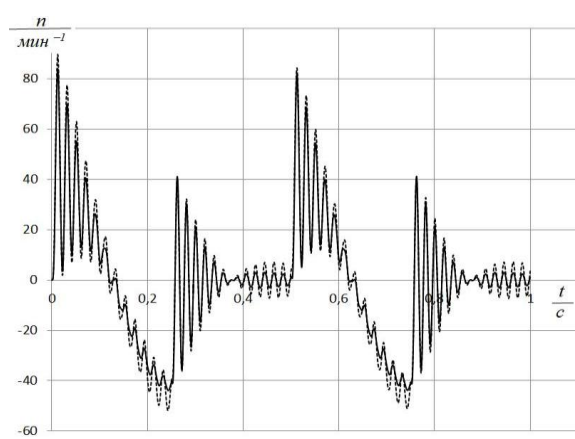


Рис. 9. Частота вращения при амплитудной модуляции с $U_1 = U_2 = 220 \text{ В}$, $f_1 = 52 \text{ Гц}$, $f_2 = 50 \text{ Гц}$

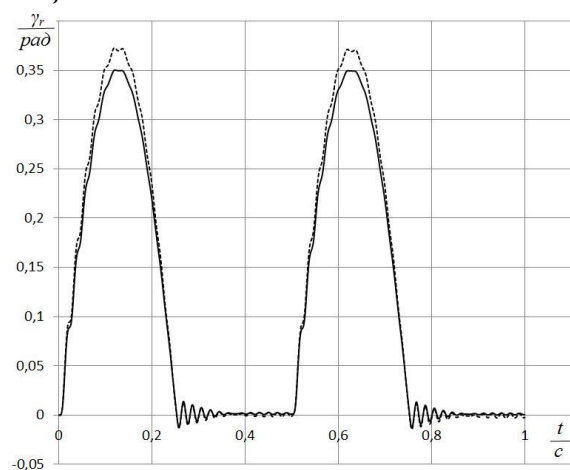


Рис. 10. Угол поворота ротора при амплитудной модуляции с $U_1 = U_2 = 220 \text{ В}$, $f_1 = 52 \text{ Гц}$, $f_2 = 50 \text{ Гц}$



Рис. 11. Напряжение статорной обмотки по оси α при фазовой модуляции с $U_1 = U_2 = 55 \text{ В}$, $f_1 = 12 \text{ Гц}$, $f_2 = 10 \text{ Гц}$

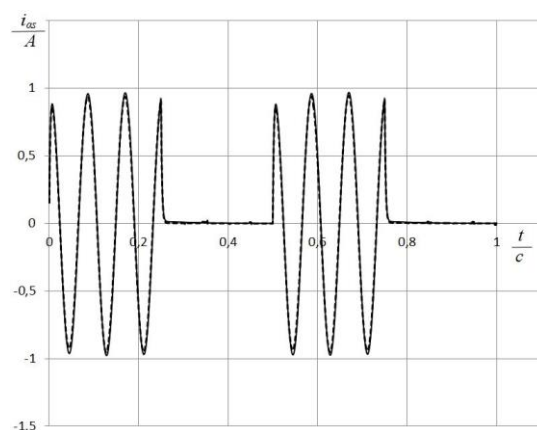


Рис. 12. Ток статорной обмотки по оси α при фазовой модуляции с $U_1 = U_2 = 55 \text{ В}$, $f_1 = 12 \text{ Гц}$, $f_2 = 10 \text{ Гц}$

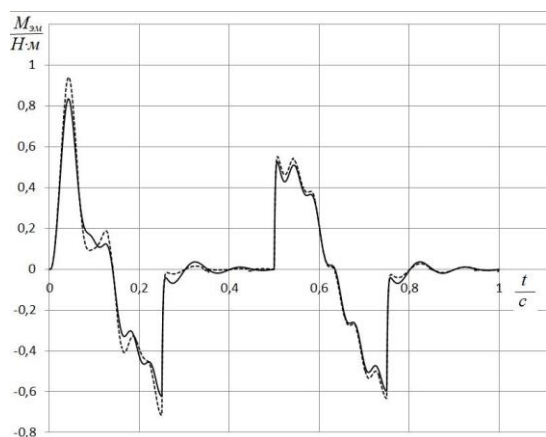


Рис. 13. Электромагнитный момент при фазовой модуляции с $U_1 = U_2 = 55 \text{ В}$, $f_1 = 12 \text{ Гц}$, $f_2 = 10 \text{ Гц}$

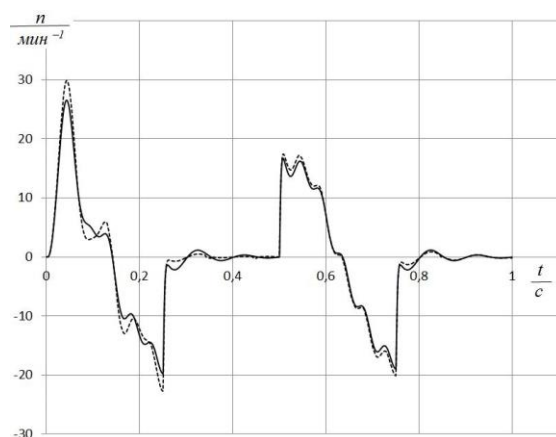


Рис. 14. Частота вращения при фазовой модуляции с $U_1 = U_2 = 55 \text{ В}$, $f_1 = 12 \text{ Гц}$, $f_2 = 10 \text{ Гц}$

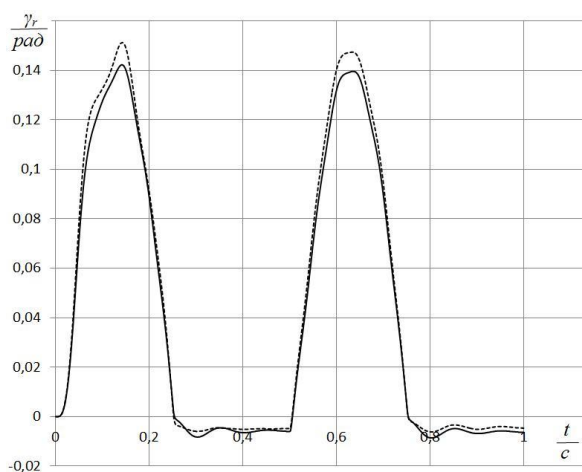


Рис. 15. Угол поворота ротора при фазовой модуляции с $U_1 = U_2 = 55 \text{ В}$, $f_1 = 12 \text{ Гц}$, $f_2 = 10 \text{ Гц}$



Рис. 16. Напряжение статорной обмотки по оси α при амплитудной модуляции с $U_1 = U_2 = 55 \text{ В}$, $f_1 = 12 \text{ Гц}$, $f_2 = 10 \text{ Гц}$

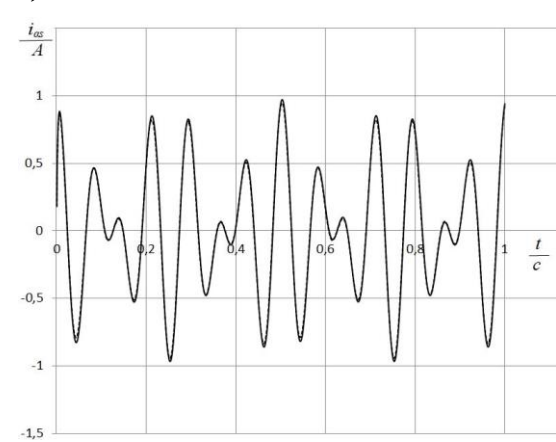


Рис. 17. Ток статорной обмотки по оси α при амплитудной модуляции с $U_1 = U_2 = 55 \text{ В}$, $f_1 = 12 \text{ Гц}$, $f_2 = 10 \text{ Гц}$

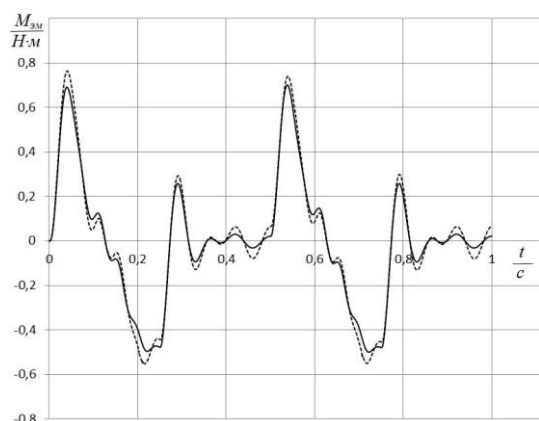


Рис. 18. Электромагнитный момент при амплитудной модуляции с $U_1 = U_2 = 55 \text{ В}$, $f_1 = 12 \text{ Гц}$, $f_2 = 10 \text{ Гц}$

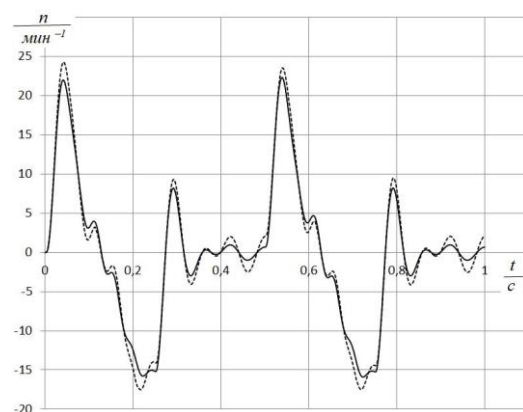


Рис. 19. Частота вращения при амплитудной модуляции с $U_1 = U_2 = 55 \text{ В}$, $f_1 = 12 \text{ Гц}$, $f_2 = 10 \text{ Гц}$

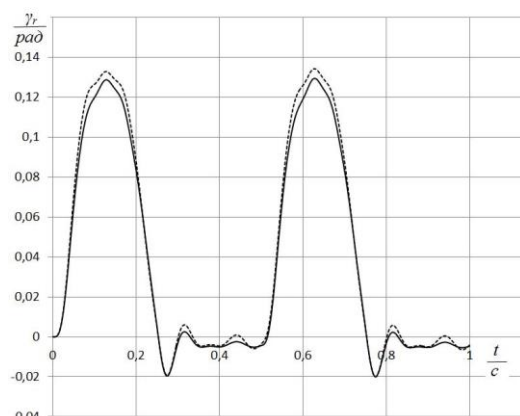


Рис. 20. Угол поворота ротора при амплитудной модуляции с $U_1 = U_2 = 55 \text{ В}$, $f_1 = 12 \text{ Гц}$, $f_2 = 10 \text{ Гц}$

Результаты моделирования показывают, что учет названных факторов дает несколько большие максимальные значения тока, электромагнитного момента, частоты вращения и угла поворота ротора (на 7 – 10%), что необходимо учитывать при анализе энергетических и динамических показателей пульсирующего асинхронного электропривода.

Список литературы

1. Нагорный В. О. Управление двухфазным асинхронным двигателем в оптико-механических системах со сканированием / В. О. Нагорный, А. В. Аристов // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2013. № 2 (28). С. 60–63.

2. *Нагорный В. О.* Асинхронный электропривод антенны радиолокатора секторного обзора в режиме пульсирующего движения / В. О. Нагорный, А. В. Аристов // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16. № 1. С. 97–103.

3. *Нагорный В. О.* Асинхронный электропривод пульсирующего движения: дис. ... канд. техн. наук / ТПУ; В. О. Нагорный; науч. рук. А. В. Аристов. Томск, 2016. 208 с.

4. *Шестаков А. В.* Электронный симулятор стенда «Исследование трехфазного асинхронного двигателя» // Известия вузов. Электромеханика. 2013. № 4. С. 70–76.

5. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Б. К. Клоков и др. М.: Изд-во «Юрайт», 2011. 767 с.

6. *Радин В. И.* Унифицированная серия асинхронных двигателей «Интерэлектро» / В. И. Радин, И. Лондин, В. Д. Розенкоп. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.

ШЕСТАКОВ Александр Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрических машин и аппаратов, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: shestakov@vyatsu.ru