

УДК 62-83: 621.314

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ «ВЕНТИЛЬНО-ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ ИНВЕРТОР – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»

Ставицкий В.Н., ассистент,
Донецкий государственный технический университет

Исследованы установившиеся процессы в оригинальной схеме автономного инвертора. Разработана математическая модель статического режима работы преобразователя.

Explored static processes in original scheme of autonomous inverter. It is developed the mathematical model of static mode of the converter operations.

Одним из возможных способов улучшения эксплуатационных показателей существующих шахтных электровозов [1] является применение в качестве тягового привода переменного тока на основе асинхронных двигателей (АД), оснащенных соответствующим преобразователем напряжения. В качестве последнего может быть использован вентильно-трансформаторный инвертор (ВТИ) (рис.1), схема которого удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к системам регулирования скорости тягового привода и рудничному электрооборудованию. С целью выяснения степени влияния параметров преобразователя на тяговые свойства и энергетические характеристики привода разработана математическая модель электро-механических процессов в системе ВТИ-АД [2], позволяющая исследовать

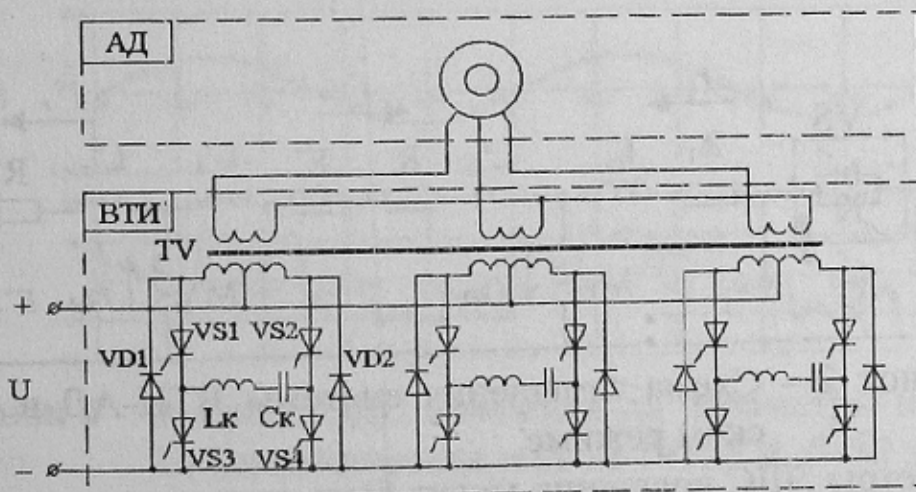


Рисунок 1 – Силовая схема привода

довать ее динамику. Дальнейшим ее развитием является математическое описание установившихся процессов, которое может быть использовано для определения рациональных параметров привода.

Переход от матрично-топологических характеристик к комплексным величинам позволил получить систему уравнений (1), описывающую установившиеся электромагнитные процессы в исследуемой схеме.

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + L_{1\sigma} \cdot p\dot{I}_1 + M_{12} \cdot p\dot{I}_{0T}, \\ 0 = (R_2 + R_s) \cdot \dot{I}'_{2s} + (L_{2\sigma} + L_{s\sigma}) \cdot p\dot{I}'_{2s} + M_{12} \cdot p\dot{I}'_{0T} + M_{sr} \cdot p\dot{I}'_{0d}, \\ 0 = R_r \cdot \dot{I}''_r + L_{r\sigma} \cdot p\dot{I}''_r + M_{sr} \cdot p\dot{I}''_{0d} + \dot{E}''_{вр} \end{cases} \quad (1)$$

Приведенные соотношения описывают трех группах индуктивно-связанных контуров, определяя конфигурацию схемы замещения системы ВТИ-АД (рис.2). Решение системы уравнений (1) относительно входящих в нее токов позволяет получить зависимости для статического режима работы привода.

Величина E_1 , входящая в состав указанных уравнений и схемы замещения, представляет собой вектор напряжения, действующего на входе первичной обмотки инверторного трансформатора, и формируемого в результате взаимодействия ЭДС источника и ЭДС, обусловленного реакцией электромагнитической системы – $E_{вр}$ (рис.3). Как известно, данная ЭДС оказывает существенное влияние на процессы в системах с полупроводниковыми коммутаторами [3]. Диаграммы, представленные на рис.3, подтверждают справедливость подобных предположений и в отношении системы ВТИ-АД: ЭДС вращения вызывает изменение формы напряжения на выходе инвертора по сравнению с режимом работы на аналогичную неподвижную RL-нагрузку.

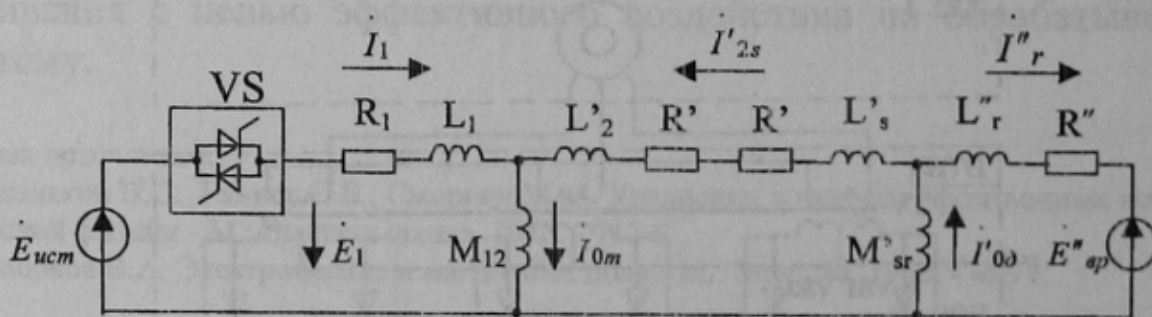


Рисунок 2 - Схема замещения системы ВТИ-АД в статическом режиме

Параметры ЭДС вращения могут быть определены в результате решения системы уравнений (1):

$$E_{вр}(t) = \sum_i E_{врm}^{(i)} \cos(\omega^{(i)}t + \psi_{вр}^{(i)}), \quad (2)$$

$$E_{врm}^{(i)} = \frac{\omega_r M_{12} M_{sr} R_r E_{1m}^{(i)}}{L_1 L_r (\sigma_r L_2 + \sigma_d L_s) \sqrt{\{Re(p_1)^2 + [\omega^{(i)} - Im(p_1)]^2\} \{Re(p_2)^2 + [\omega^{(i)} - Im(p_2)]^2\}}}, \quad (3)$$

$$\psi_{вр}^{(i)} = \psi_1^{(i)} + \frac{\pi}{2} - \arg\{Re(p_1) - j[\omega^{(i)} - Im(p_1)]\} - \arg\{Re(p_2) - j[\omega^{(i)} - Im(p_2)]\} \quad (4)$$

где $E_{врm}^{(i)}$ - амплитуда i -ой гармоники ЭДС вращения; $\psi_{вр}^{(i)}$ - фаза i -ой гармоники ЭДС вращения; $E_{1m}^{(i)}$ - амплитуда i -ой гармоники, $\psi_1^{(i)}$ - фаза i -ой гармоники напряжения на входе первичной обмотки трансформатора; σ_r, σ_d - полные коэффициенты рассеяния трансформатора и АД; p_1, p_2 - корни характеристического уравнения системы (1).

Анализ результатов моделирования и полученных выше соотношений для ЭДС вращения позволяет сделать ряд выводов относительно взаимного влияния ЭДС вращения и остальных процессов в системе ВТИ-АД:

1. Сопоставление амплитуд гармонических составляющих ЭДС вращения свидетельствует о значительном преобладании первой гармоники, несмотря на сравнительно высокую амплитуду высших составляющих в спектре напряжения, действующего на входе инвертора (при $E_{1m}^{(5)}/E_{1m}^{(1)}=0.43, E_{врm}^{(5)}/E_{врm}^{(1)}=0.03$), что подтверждается диаграммами, полученными при моделировании (рис.3).

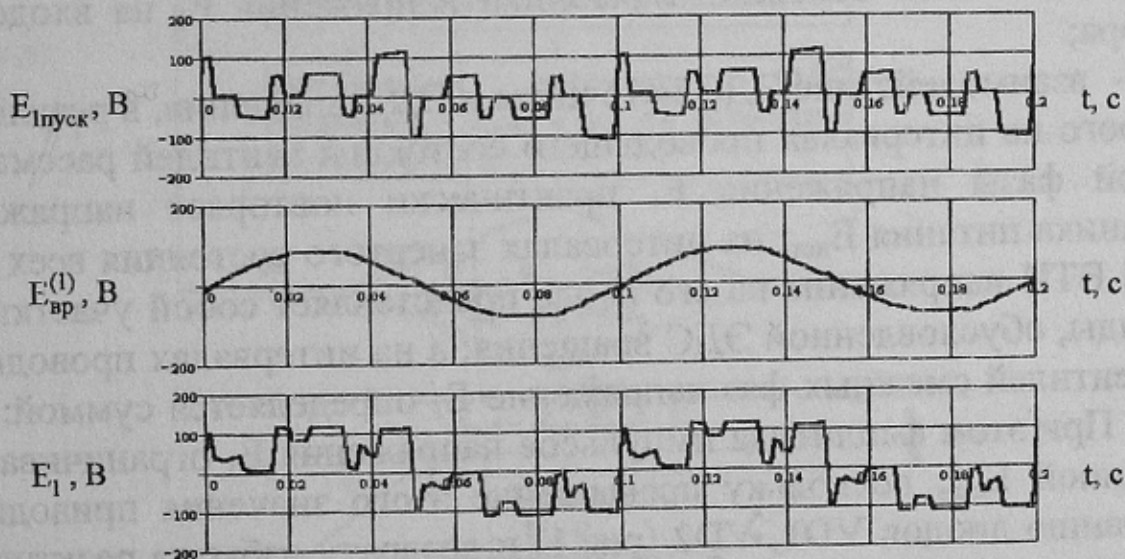


Рисунок 3 - Влияние ЭДС вращения на параметры напряжения E_1 (динамическая модель $f=10$ Гц, $\beta=30$ эл.гр)

Данный факт позволяет при анализе влияния ЭДС вращения на процессы в системе ограничиться рассмотрением лишь ее первой гармоники:

$$E_{вр}(t) \approx E_{врm}^{(1)} \cos(\omega^{(1)}t + \psi_{вр}^{(1)}) \quad (5)$$

2. Согласно схемы замещения системы (рис.2) токи в ветвях системы определяются напряжением, представляющим собой результат взаимодействия величин E_1 и $E_{вр}$ (с учетом незначительного влияния параллельных ветвей намагничивания трансформатора и двигателя), что подтверждается характером изменения токов, полученных при моделировании (рис.3). Пренебрегая влиянием цепей намагничивания трансформатора и двигателя, ток I_1 , потребляемый системой, может быть определен следующим образом:

$$\dot{I}_1 \approx \frac{\dot{E}_1 + \dot{E}_{вр}}{\dot{Z}_{1\sigma} + \dot{Z}_{2\sigma} + \dot{Z}_{s\sigma} + \dot{Z}_{r\sigma}} \quad (6)$$

3. Основными факторами, которые определяют характер процессов, происходящих в системе ВТИ-АД и, в частности, параметры ЭДС вращения, являются:

- момент сопротивления (M_c) на валу АД, обуславливающий частоту вращения ротора (ω_r):

$$M = \frac{1.5pE_{1m}^{(1)}M_{12}^2M_{sr}^2R_r(\omega - \omega_r)}{L_1^2L_r^2(\sigma_T L_2 + \sigma_d L_s) \{Re(p_1)^2 + [\omega - Im(p_1)]^2\} \{Re(p_1)^2 + [\omega - Im(p_1)]^2\}} \quad (7)$$

- интервал проводимости тиристора (β), определяющий действующее значение основной гармоники напряжения E_1 на входе инвертора;

- взаимодействие ЭДС источника и ЭДС вращения, в результате которого на интервалах проводящего состояния вентиля рассматриваемой фазы напряжение E_1 практически повторяет напряжение источника питания $E_{ист}$; на интервалах запертого состояния всех вентилях ВТИ напряжение на его входе представляет собой участки синусоиды, обусловленной ЭДС вращения; а на интервалах проводимости вентилях смежных фаз напряжение E_1 определяется суммой: $E_{ист}$ и $E_{вр}$. При этом амплитуда импульсов напряжения E_1 ограничивается величиной $E_{ист}$, поскольку превышение этого значения приводит к отпиранью диодов VD1, VD2 (рис.1) и возврату избытка реактивной энергии в источник. Таким образом, взаимодействие ЭДС источника и ЭДС вращения, в результате которого формируется напряжение на входе ВТИ, носит нелинейный характер.

Совместное действие данных факторов однозначно определяет модули и ориентацию векторов рабочих токов и напряжений в установившемся режиме относительно известных пусковых значений. На основании описанных зависимостей составлен алгоритм, позволяющий определить установившиеся параметры напряжения E_1 и ЭДС E_v (рис.4).

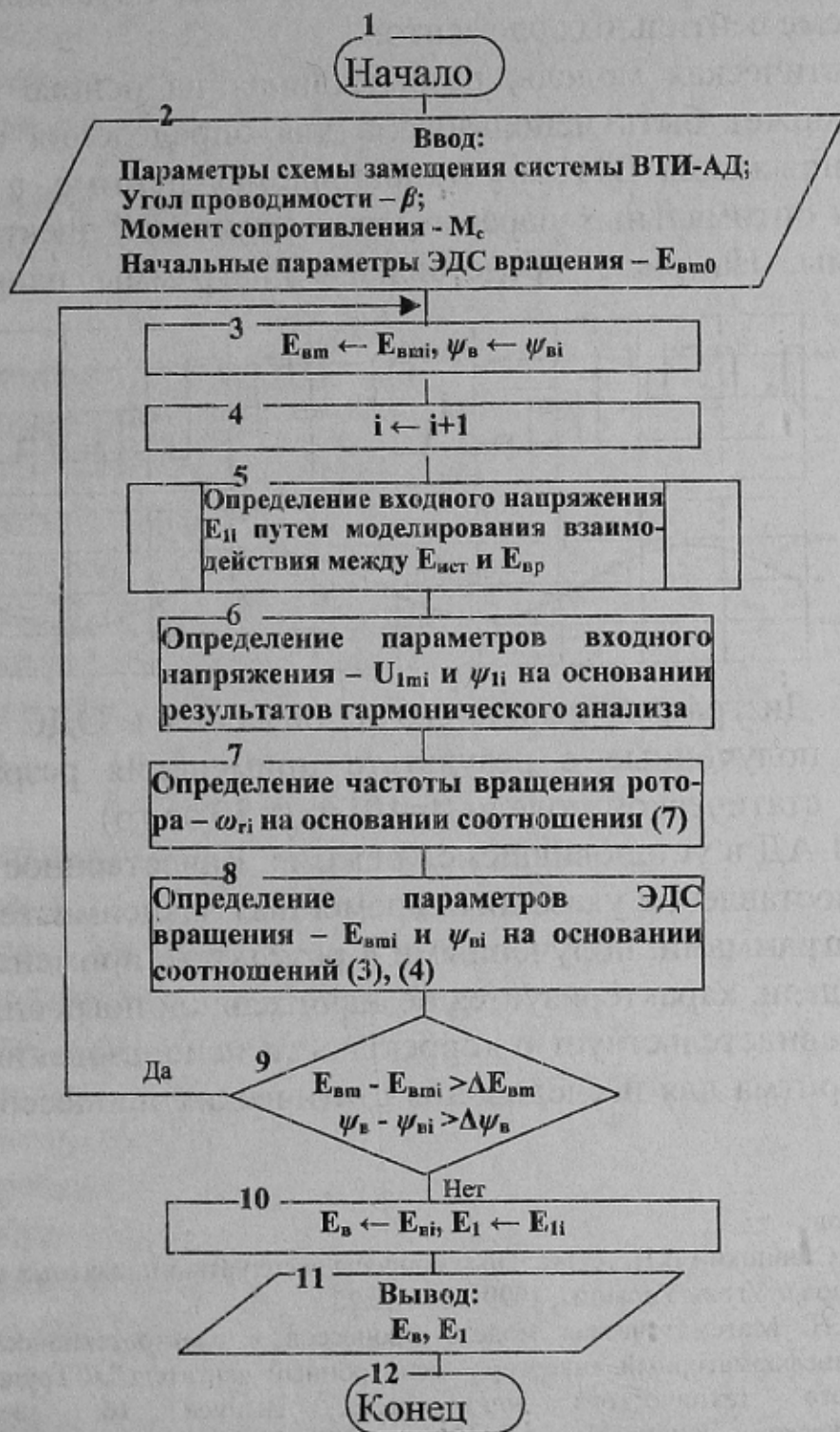


Рисунок 4 - Блок-схема алгоритма моделирования параметров напряжений в системе ВТИ-АД в установившемся режиме

Данный алгоритм, описывающий процесс формирования ЭДС вращения и входного напряжения, реализован с помощью вычислительных средств системы математических расчетов MathCAD 7.0 PRO. Представленная математическая модель отличается от известных учетом влияния на процесс формирования напряжений и токов ЭДС вращения приводного АД, а также учетом нелинейного характера взаимодействия ЭДС вращения и источника, обусловленного наличием в схеме вентильных элементов.

Математическая модель, разработанная на основе указанного алгоритма, может быть использована для определения параметров входного напряжения ВТИ в установившемся режиме, а также для определения оптимальных параметров исследуемой электротехнической системы. На рис.5 представлены диаграммы напряжений в

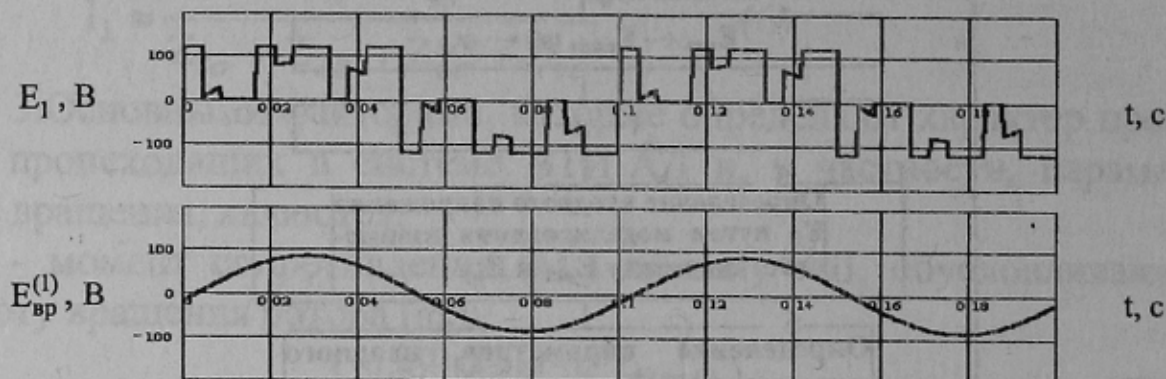


Рисунок 5 – Диаграммы выходного напряжения и ЭДС вращения, полученные в результате применения разработанной статической модели ($f=10\text{Гц}$, $\beta=30$ эл.гр) системе ВТИ-АД в установившемся режиме. Качественное и количественное сопоставление указанных временных зависимостей с аналогичными диаграммами, полученными в результате применения динамической модели, характеризуется незначительной погрешностью (не более 4%) и свидетельствует о корректности использования разработанного алгоритма для исследования статических процессов в системе ВТИ-АД.

Список источников:

1. Маренич К.Н., Ставицкий В.Н. Актуальные вопросы эксплуатации шахтных аккумуляторных электровозов // Уголь Украины, 1999, №6. – с.25.
2. Ставицкий В.Н. Математическая модель процессов в электротехнической системе “вентильно-трансформаторный инвертор – асинхронный двигатель” // Труды Донецкого государственного технического университета. Выпуск 16, серия горно-электромеханическая – Донецк: ДонГТУ, 2000. – с.263-271.
3. Маренич К.Н. Асинхронный электропривод горных машин с тиристорными коммутаторами. Донецк: ДонГТУ, 1997. – 64 с.