

## ДИНАМИКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВАЛА С ВНУТРЕННЕЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

Системы синхронного вращения (ССВ) находят применение в различных отраслях промышленности. Часто их использование необходимо по техническим причинам, там, где применение механических связей не дает необходимой жесткости или затруднено конструктивно. Одним из наиболее простых и экономичных устройств, для обеспечения согласованной работы является так называемый «электрический вал» (ЭВ), возникающий в результате электрического соединения статорных и роторных цепей двух или нескольких асинхронных двигателей с фазными роторами [1]. Существенное преимущество «электрического вала» заключается в простоте его конструкции и в возможности применять нормальные машины. Это устройство для обеспечения согласованной работы является очень надежным в эксплуатации, мало подвержено неполадкам и может при тщательном проектировании применяться без каких-либо затруднений в широких диапазонах скоростей вращения. Несмотря на свою конструктивную простоту, ЭВ требует большой тщательности при проектировании. Необходимо обязательно проводить проверку динамической устойчивости, так как при возникновении резонансов и при недостаточном демпфировании колебаний приводных групп обеспечить точность и надежность работы устройства согласованного вращения невозможно.

Целью данной работы является: определение областей устойчивой работы рабочего ЭВ при изменении параметров цепей АМ в широких пределах; влияние этих параметров на величину удельного синхронизирующего момента ЭВ; оценка качества переходных процессов при воздействии на ЭВ по каналам управления и возмущения. В связи с очень сложными электромагнитными процессами в АМ [2] единственным методом исследования ЭВ является математическое моделирование и наиболее мобильная его ветвь – компьютерное. В связи с достоинствами выбрана модель асинхронного двигателя в форме « $\Psi_s - I_r$ », допускающая без значительных преобразований объединение ее с моделью роторного выпрямителя, которая наиболее пригодна для решения поставленных задач [3]:

$$\frac{d}{dt}(\Psi_{a1} - \Psi_{b1}) = U_{ab1} - \alpha_s \omega_b (\Psi_{a1} - \Psi_{b1}) - \frac{\omega_b}{\sqrt{3}} (\Psi_{c1} - \Psi_{a1}) + \frac{\omega_b}{\sqrt{3}} (\Psi_{b1} - \Psi_{c1}) + r_1 k_s I_{a2} - r_1 k_s I_{b2}$$

$$\frac{d}{dt}(\Psi_{b1} - \Psi_{c1}) = U_{bc1} - \alpha_s \omega_b (\Psi_{b1} - \Psi_{c1}) - \frac{\omega_b}{\sqrt{3}} (\Psi_{a1} - \Psi_{b1}) + \frac{\omega_b}{\sqrt{3}} (\Psi_{c1} - \Psi_{a1}) + r_1 k_s I_{b2} - r_1 k_s I_{a2}$$

$$\frac{d}{dt}(\Psi_{c1} - \Psi_{a1}) = -\frac{d}{dt}(\Psi_{a1} - \Psi_{b1}) - \frac{d}{dt}(\Psi_{b1} - \Psi_{c1})$$

$$\frac{d}{dt} I_{a2} = -\frac{k_s}{3\alpha_2} \omega \frac{d}{dt} (\Psi_{a1} - \Psi_{b1}) + \frac{k_s}{3\alpha_2} \omega \frac{d}{dt} (\Psi_{c1} - \Psi_{a1}) - \alpha_r \omega I_{a2}$$

$$\frac{d}{dt} I_{b2} = -\frac{k_s}{3\alpha_2} \omega \frac{d}{dt} (\Psi_{b1} - \Psi_{c1}) + \frac{k_s}{3\alpha_2} \omega \frac{d}{dt} (\Psi_{a1} - \Psi_{b1}) - \alpha_r \omega I_{b2}$$

$$\frac{d}{dt} I_{c2} = -\frac{k_s}{3\alpha_2} \omega \frac{d}{dt} (\Psi_{c1} - \Psi_{a1}) + \frac{k_s}{3\alpha_2} \omega \frac{d}{dt} (\Psi_{a1} - \Psi_{b1}) - \alpha_r \omega I_{c2}$$

$$M = -\frac{2k_s}{3\sqrt{3}} [I_{a2}(\Psi_{b1} - \Psi_{c1}) + I_{b2}(\Psi_{c1} - \Psi_{a1}) + I_{c2}(\Psi_{a1} - \Psi_{b1})]$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$$

где  $I_{a2}$ ,  $I_{b2}$ ,  $I_{c2}$  – мгновенные значения токов ротора;

$U_{ab1}$ ,  $U_{bc1}$  – мгновенные значения напряжений статора;

$\alpha_s = \frac{r_1}{x_s}$  – коэффициент затухания в цепях статора;  $\alpha_r = \frac{r_1}{x_r}$  – коэффициент затухания в цепях ротора;

$k_s = \frac{x_o}{x_s}$  – коэффициент рассеяния обмотки статора;  $k_r = \frac{x_o}{x_r}$  – коэффициент рассеяния обмотки ротора;

$\sigma = 1 - k_s k_r$  – коэффициент рассеяния по Блонделю;  $\omega_b$  – базисная скорость;

$\omega$ ,  $\omega$  – электрическая и механическая скорости вращения ротора;

$x_s, x_r, x_0$  – полные индуктивные сопротивления обмоток статора, ротора и контура намагничивания, приведенные к ротору;

$r_s, r_r$  – активные сопротивления обмоток статора, ротора, приведенные к ротору.

Рабочий ЭВ представляет две АМ, объединенные роторными цепями при питании статорных обмоток от одного источника синусоидального напряжения. Между роторными обмотками и источником напряжения постоянного тока двунаправленной проводимости включен АИН на IGBT-транзисторах. Построение цифровой модели ЭВ ведется с использованием пакета MATLAB в средах SIMULINK и SIM POWER SYSTEM (SPS). Применение SPS дает существенную выгоду при моделировании ССВ и каскадных приводов с преобразователями, так как отпадает необходимость в составлении громоздких дифференциальных уравнений роторных цепей. Модель состоит из блоков-подсистем [4]. Изменена только подсистема ROTOR (блок вычисления роторных токов), АИН и САР (частично выполнен в пакете SIM POWER SYSTEM). Они представлены на рис. 1, где приведена модель роторной цепи ССВ в пакете SPS, составленная на базе принципиальной схемы. Здесь: Ea1 – Ea6 – управляемые источники напряжения, имитирующие ЭДС фаз ротора; Ra21–Rc22, La21–Lc22 – активные сопротивления обмоток ротора и собственные индуктивности обмоток статора и ротора, приведенные к ротору, для двигателей 1 и 2; UZ – автономный инвертор напряжения в роторной цепи АМ; 3C1, 3C2, 3C3 – составляют датчик скорости для формирования ramпы; ЗИС – датчик интенсивности скорости; Ф – фильтр; РС – регулятор скорости; РТА, РТВ, РТС – регуляторы токов фаз А, В, С.

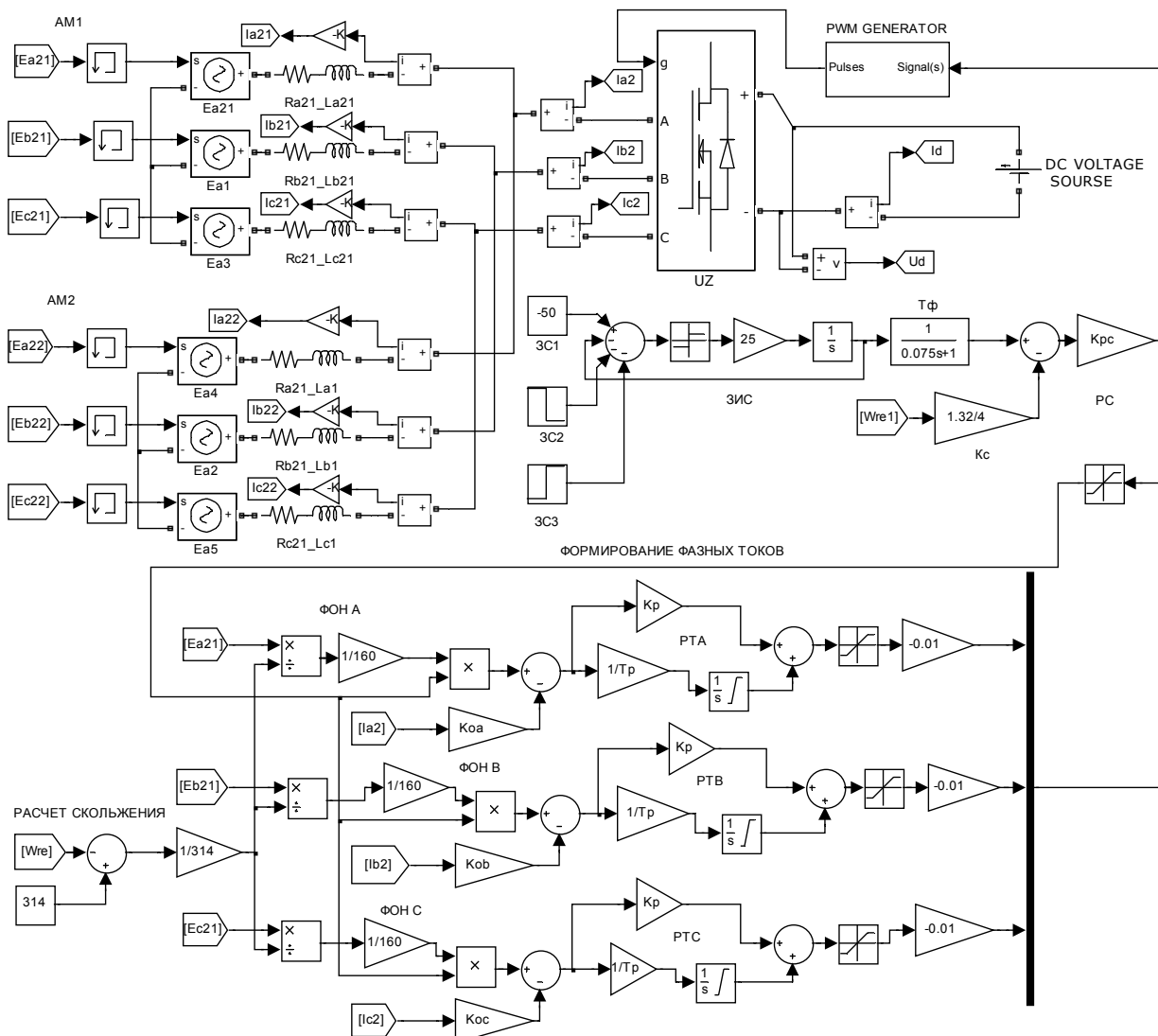


Рис.1. Подсистема преобразования напряжения, определение токов ротора, расчета САР.

В качестве задающих сигналов для регуляторов фазных токов используется произведение выходной величины регулятора скорости на единичные сигналы опорных напряжений, которые совпадают по частоте и фазе с ЭДС ротора для каждой фазы соответственно. Опорные сигналы формируются из сигналов отношения ЭДС ротора одной из машин к ее скольжению и делятся далее на постоянный коэффициент. С регуляторов токов фаз сигналы поступают на входы модулятора PWM GENERATOR, где происходит их сравнение с пилообразным напряжением и на выходе формируется три ШИМ-модулированных сигнала для управления тремя плечами АИН. Электропривод работает в 4-х квадрантах механических характеристик. При подаче дополнительных сигналов управления на входы регуляторов токов при сдвиге на 90 градусов относительно основного опорного напряжения схема позволяет генерировать реактивную мощность.

Для исследования динамики ЭВ использованы параметры машин МТ-51-8 ( $P_n=22$  кВт,  $n_n=723$  об/мин). Графики пуска до скорости 50% от синхронной и торможения с набросом нагрузки (при 2,5с) представлены на рис. 2, а при естественных сопротивлениях статорных и роторных обмоток, а также при увеличенном сопротивлении ротора  $r_2 = 2r_{2e}$ , (рис. 2,б). На рис. 3 показаны графики тока фаз АМ ЭВ в момент наброса нагрузки. На рис. 4 показаны области устойчивой работы ЭВ при разных значениях сопротивлений обмоток статора и ротора для разных частот вращения. Из этого видно, что при активных сопротивлениях обмоток область устойчивой работы лежит выше  $0,4\omega_0$ . При увеличении активных сопротивлений обмоток область устойчивой работы лежит выше  $0,5\omega_0$ . Увеличение активных сопротивлений статорных и роторных обмоток уменьшает удельный синхронизирующий момент (УСМ) ЭВ (рис. 5, график  $R_2$ ) по сравнению с естественными параметрами (рис. 5, график  $2R_2$ ). На рис. 6 показаны графики скорости двух машин ЭВ при пуске – торможении с движением в отрицательном направлении при набросе нагрузки с сопротивлением ротора  $r_2=2,5r_{2e}$ .

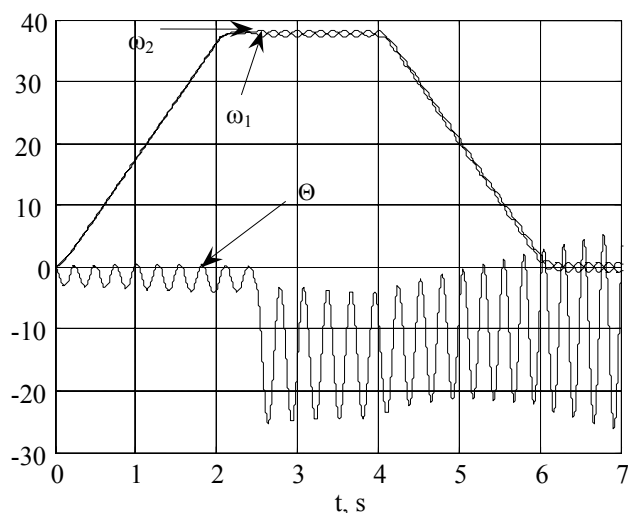


Рис. 2,а. Графики пуска, торможения, и угла рассогласования рабочего ЭВ

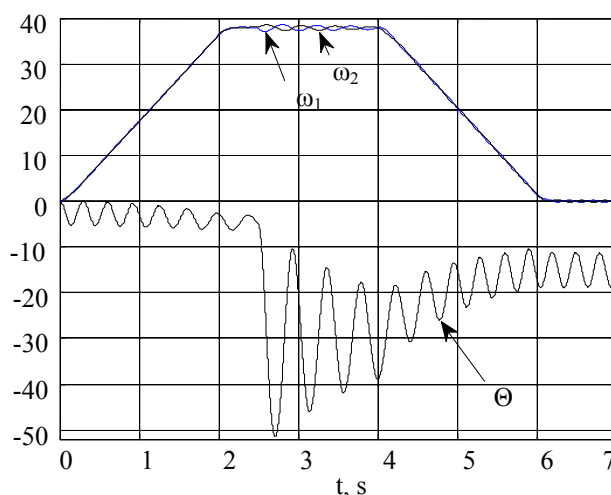


Рис. 2,б. Графики пуска, торможения, и угла рассогласования рабочего ЭВ при удвоенном  $r_2$

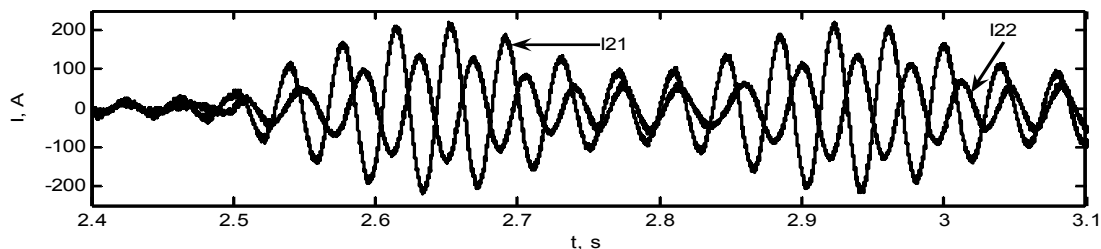


Рис. 3. Графики фазных токов ротора АМ рабочего ЭВ в момент наброса нагрузки

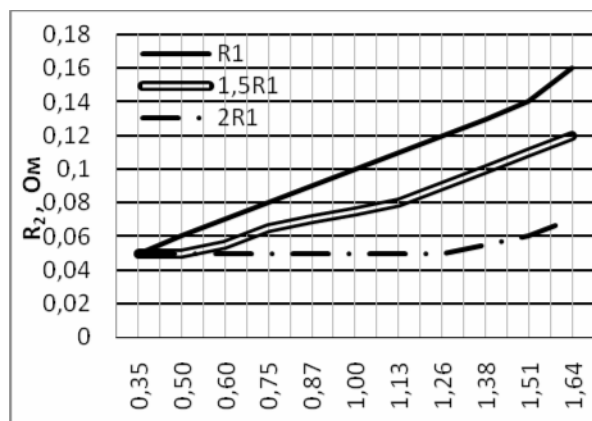


Рис. 4. Области устойчивой работы ЭВ

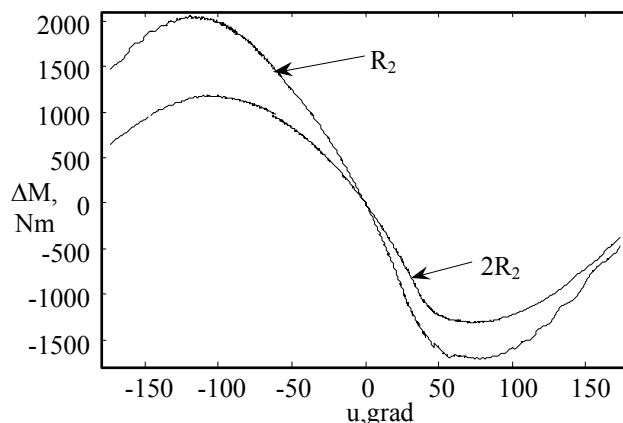


Рис. 5. Зависимость УСМ от угла рассогласования ЭВ

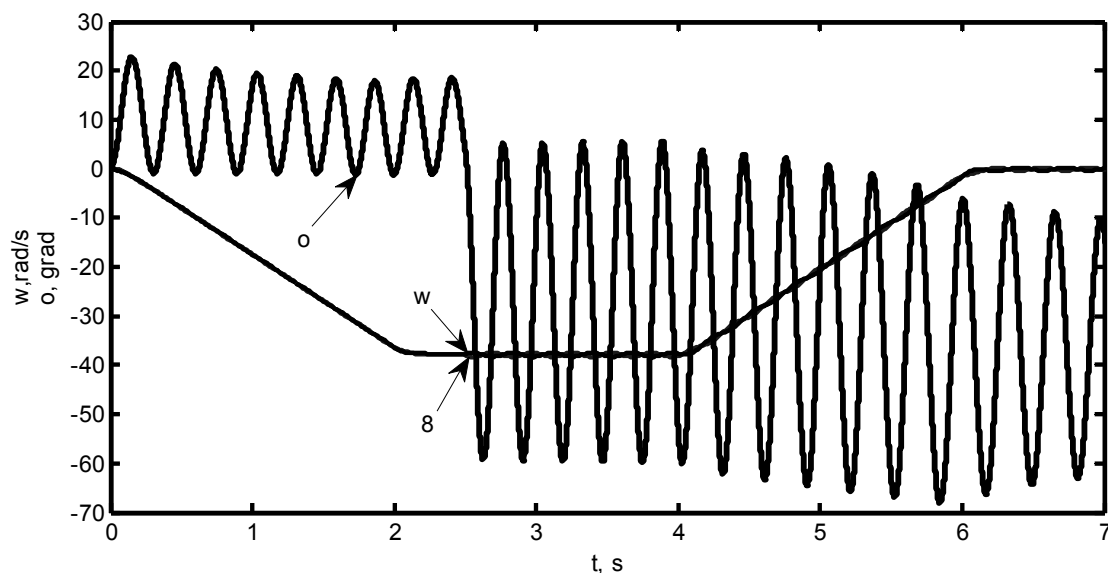


Рис. 6. Графики пуска, торможения, и угла рассогласования рабочего ЭВ при  $r_2=2.5r_{2e}$  и  $s=1.5$

#### Выводы:

1. Как видно, рассмотренный ЭВ обеспечивает хорошие динамические свойства, устойчивость к ударным нагрузкам, точность поддержания заданной скорости, с обеспечением синхронного вращения валов.
2. Вместе с тем при скольжениях  $s > (0,4 - 0,5)$  наблюдается раскачивание колебаний в системе ЭВ, что приводит к развалу синхронного вращения. Для повышения затухания в системе ЭВ необходимо включать добавочные сопротивления в роторные (статорные) цепи. Так при увеличенном в 2,0...2,5 раза активном сопротивлении роторных или статорных цепей (длинный ЭВ – удаленное расположение синхронизируемых механизмов) ЭВ динамически устойчив для диапазона скольжений 0.1 – 2.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Унгру Флоренс, Иордан Гейнс. Системы согласованного вращения асинхронных электродвигателей. – Ленингр. отд., Энергия, 1971. – 182 с.
2. Шевченко І.С., Морозов Д.І. Електромеханічні процеси в асинхронному електроприводі: Навч. посіб. – Алчевськ: ДонДТУ, 2009. – 350с.
3. Сандлер А.С., Тарасенко Л.М. Динамика каскадных асинхронных электроприводов. – М.: Энергия, 1977. – 200 с.
4. Макурин А.В., Шевченко И.С., Самчелев Ю.П., Калюжный В.В. Цифровое моделирование систем синхронного вращения с асинхронными машинами. – Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2006. – Вип. 3/2006 (38). Частина 2. 166 с.