

УДК 62-83-52

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРУЗОЧНОЙ ЧАСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА, ИНВАРИАНТНОГО К СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА

**И. В. ДОРОЩЕНКО, В. С. ЗАХАРЕНКО, В. А. САВЕЛЬЕВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

Нагрузочный стенд для испытания электродвигателей и двигателей внутреннего сгорания, построенный на основе асинхронно-вентильного каскада (АВК), как объект автоматического управления представляет систему с переменными параметрами, непосредственная оптимизация которой связана с некоторыми трудностями. При этом асинхронный двигатель, входящий в состав стенда, должен рассматриваться не изолированно от выпрямителя и инвертора в роторной цепи, а в тесной связи с ними [1].

Анализ материалов, опубликованных научных исследований в области построения стендов на основе АВК показывает, что вывод уравнения электромагнитного момента, построение структур стендов на основе АВК выполнены, исходя из уравнений цепи выпрямленного тока [1], [2, с. 481–490], [3, с. 160–165]. К недостаткам такого подхода следует отнести пренебрежение электромагнитными нестационарными процессами в асинхронной машине, а электромагнитные процессы цепи выпрямленного тока ротора рассматриваются, исходя из «гладких» составляющих ЭДС роторной и сетевой групп вентиля [1].

### Основная часть

Используя известную математическую модель обобщенной электрической машины в неподвижной относительно вращающегося магнитного поля системе координат  $x - y$  [2, с. 96–97], составим систему уравнений для нагрузочной части инвариантного стенда с рекуперацией энергии на основе АВК. Система уравнений (с учетом приведения параметров статора к цепи ротора), описывающая нагрузочную часть исследуемого стенда, примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} U'_{1m} = R'_1 \cdot i'_{1x} + \frac{d\Psi'_{1x}}{dt} - \omega_{0эл} \cdot \Psi'_{1y}; \\ 0 = R'_1 \cdot i'_{1y} + \frac{d\Psi'_{1y}}{dt} + \omega_{0эл} \cdot \Psi'_{1x}; \\ 0 = R_{2\Sigma} \cdot i_{2x} + \frac{d\Psi_{2x}}{dt} - (\omega_{0эл} - \omega_{эл})\Psi_{2y} - E_{и} \frac{1}{k_{сх}}; \\ 0 = R_{2\Sigma} \cdot i_{2y} + \frac{d\Psi_{2y}}{dt} + (\omega_{0эл} - \omega_{эл})\Psi_{2x}; \\ M = \frac{p_{л} \cdot L_{12}}{L_1 \cdot L_{2\Sigma} - L_{12}^2} (\Psi'_{1y} \cdot \Psi_{2x} - \Psi'_{1x} \cdot \Psi_{2y}), \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $U'_{1m}$  – амплитуда напряжения статора, приведенного к цепи ротора;  $R'_1$  – сопротивление фазы статора, приведенное к цепи ротора;  $i'_{1x}$ ,  $i'_{1y}$  – токи статора, приведенные к цепи ротора;  $\Psi'_{1x}$ ,  $\Psi'_{1y}$ ,  $\Psi_{2x}$ ,  $\Psi_{2y}$  – потокосцепления статора и ротора;  $\omega_{0эл} = 2\pi \cdot f_1$  – угловая скорость поля статора;  $f_1$  – частота напряжения статора;  $R_{2\Sigma} = R_2 + R_{др} + R_{и}$  – суммарное активное сопротивление роторной цепи с учетом инвертора;  $R_2$  – сопротивление фазы ротора;  $R_{и}$  – коммутационное сопротивление инвертора;  $R_{др}$  – активное сопротивление дросселя в цепи постоянного тока;  $i_{2x}$ ,  $i_{2y}$  – токи ротора;  $\omega_{эл}$  – угловая скорость ротора;  $E_{и}$  – ЭДС управляемого инвертора;  $k_{сх}$  – схемный коэффициент инвертора;  $M$  – электромагнитный момент машины;  $p_d$  – число пар полюсов двигателя;  $L_1 = L_{1\sigma} + L_{12}$  – полная индуктивность обмотки фазы статора;  $L_{1\sigma}$  – индуктивность рассеяния обмотки фазы статора (для Т-образной схемы замещения);  $L_{12}$  – взаимная индуктивность;  $L_2 = L_{2\sigma} + L_{12}$  – полная индуктивность обмотки фазы ротора;  $L_{2\sigma}$  – индуктивность рассеяния обмотки фазы ротора (по Т-образной схеме замещения);  $L_{2\Sigma} = L_2 + L_{др}$  – суммарная индуктивность роторной цепи с учетом цепи постоянного тока;  $L_{др}$  – индуктивность дросселя в цепи постоянного тока.

В статическом режиме производные переменных величин будут равны нулю. Если для первых двух уравнений системы (1) принять  $R'_1 \approx 0$ , что справедливо для двигателей большой и средней мощности [4, с. 151], то для статического режима получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \Psi'_{1y} = -\frac{U'_{1m}}{\omega_{0эл}} = \text{const}; \\ \Psi'_{1x} = 0; \\ 0 = R_{2\Sigma} \cdot I_{2x} - (\omega_{0эл} - \omega_{эл})\Psi_{2y} - E_{и} \frac{1}{k_{сх}}; \\ 0 = R_{2\Sigma} \cdot I_{2y} + (\omega_{0эл} - \omega_{эл})\Psi_{2x}; \\ M = \frac{p_d \cdot L_{12}}{L_1 \cdot L_{2\Sigma} - L_{12}^2} \Psi'_{1y} \cdot \Psi_{2x}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $I_{2x}$ ,  $I_{2y}$  – значения токов ротора в статическом режиме.

Известная система уравнений для потокосцеплений обобщенной электрической машины [2, с. 72–73] в осях  $x - y$ , применительно к рассматриваемому стенду будет иметь вид:

$$\begin{cases} \Psi'_{1x} = L_1 \cdot i'_{1x} + L_{12} \cdot i_{2x}; \\ \Psi'_{1y} = L_1 \cdot i'_{1y} + L_{12} \cdot i_{2y}; \\ \Psi_{2x} = L_{2\Sigma} \cdot i_{2x} + L_{12} \cdot i'_{1x}; \\ \Psi_{2y} = L_{2\Sigma} \cdot i_{2y} + L_{12} \cdot i'_{1y}. \end{cases} \quad (3)$$

Система (3) применительно к описываемому стенду, с учетом первых двух уравнений системы (2) для статического режима примет вид:

$$\begin{cases} L_1 \cdot I'_{1x} = -L_{12} \cdot I_{2x}; \\ \Psi'_{1y} = L_{12} \cdot I_{2y}; \\ \Psi_{2x} = L_{2\Sigma} \cdot I_{2x} + L_{12} \cdot I'_{1x}; \\ \Psi_{2y} = L_{2\Sigma} \cdot I_{2y}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $I'_{1x}$ ,  $I'_{1y}$  – значения токов статора в статическом режиме;  $I_{2x}$ ,  $I_{2y}$  – значения токов ротора в статическом режиме.

Определим выражение для электромагнитного момента, используя системы уравнений (2) и (4). В результате выражение примет следующий вид:

$$M = K_{эм} \left[ \frac{U'_{1m} \cdot L_{2\Sigma} (\omega_{0эл} - \omega_{эл})}{\omega_{0эл}} - E_n \frac{L_{12}}{k_{сх}} \right], \quad (5)$$

$$\text{где } K_{эм} = \frac{p_d \cdot U'_{1m}}{L_1 \cdot R_{2\Sigma} \cdot \omega_{0эл}}.$$

Под инвариантностью момента следует понимать нулевое отклонение момента сопротивления, создаваемого нагрузочной частью стенда при изменении скорости приводной части стенда. На основе вышеизложенного составим функциональную схему инвариантного испытательного стенда с рекуперацией энергии на основе АВК.

С целью получения условия инвариантности на основе анализа выражения (5) можно предположить, при использовании положительной обратной связи по моменту и отрицательной по скорости можно исключить влияние скорости вращения на нагрузочный момент испытательного стенда на основе АВК, поскольку увеличение нагрузочного момента производится при уменьшении напряжения управления инвертора. На рис. 1 представлена функциональная схема нагрузочной части стенда на базе АВК с рекуперацией энергии в сеть.

Нагрузочная часть стенда (рис. 1) содержит асинхронную машину с фазным ротором (М1), вал которой предназначен для присоединения через механическую трансмиссию к испытываемому двигателю (М2). Обмотка статора машины (М1) содержит выводы, предназначенные для подключения непосредственно к трехфазной сети переменного тока. Обмотка ротора машины (М1) подключена к трехфазному входу неуправляемого выпрямителя (UZ1). Неуправляемый выпрямитель предназначен для преобразования трехфазной переменной ЭДС ротора асинхронной машины (М1) в постоянное (выпрямленное) напряжение. Выход неуправляемого выпрямителя (UZ1) через дроссель соединен с выходом управляемого преобразователя (UZ2). Управляемый преобразователь (UZ2), работающий в режиме инвертора, предназначен для регулирования нагрузки в цепи ротора асинхронной машины (М1). Вход управляемого преобразователя (UZ2) соединен со вторичной обмоткой согласующего трансформатора (Т), первичная обмотка которого снабжена выводами, предназначенными для подключения к той же сети переменного тока, что и обмотка статора асинхронной машины (М1). Таким образом, силовая часть устройства представляет собой асинхронно-вентильный каскад, а благодаря тому, что энергия скольжения асинхронной машины (М1) через управляемый преобразователь (UZ2) и согласующий трансформатор возвращается в сеть переменного тока, достигается повышение энергоэффективности испытаний.

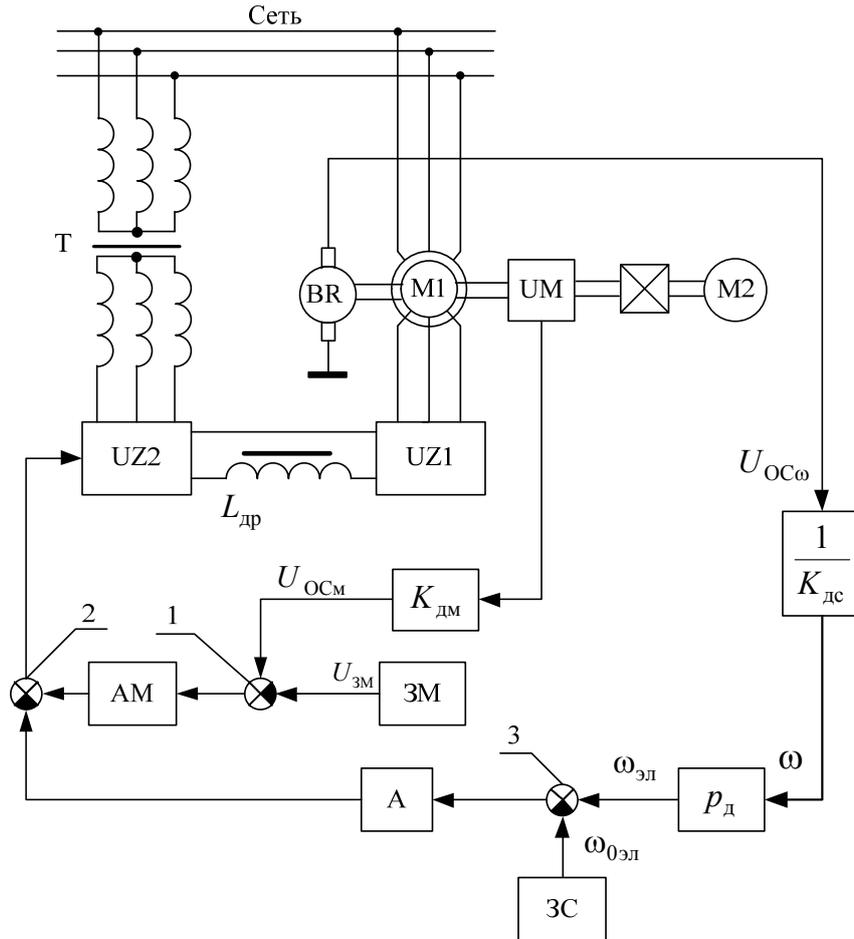


Рис. 1. Функциональная схема нагрузочной части стенда на основе АВК с рекуперацией энергии в сеть:

М1 – асинхронный двигатель с фазным ротором; М2 – испытуемый двигатель;  
 UZ1 – трехфазный мостовой выпрямитель; UZ2 – трехфазный мостовой управляемый инвертор, ведомый сетью; АМ – регулятор момента с коэффициентом передачи  $K_{PM}$ ;  
 А – усилитель с коэффициентом передачи  $K_{C1}$ ; BR – датчик скорости вращения с коэффициентом передачи  $K_{дс}$ ; UM – датчик момента с коэффициентом передачи  $K_{дм}$ ;  
 ЗМ – задатчик момента; ЗС – задатчик скорости

Система регулирования нагружающего момента содержит задатчик момента (ЗМ), предназначенный для задания величины нагружающего момента, создаваемого асинхронной машиной (М1). Выход задатчика (ЗМ) подключен к одному из входов первого сумматора (1), предназначенного для сравнения сигнала задания момента и сигнала отрицательной обратной связи с датчика момента (UM). Включенный за сумматором (1) регулятор момента АМ предназначен для формирования динамических характеристик нагрузочного устройства. Выход регулятора момента соединен с первым входом второго сумматора (2). Выход сумматора (2) соединен с управляющим входом преобразователя 6. Сумматор (2) предназначен для введения в сигнал управления управляемого преобразователя (UZ2) сигнала, компенсирующего возмущающее воздействие со стороны скорости. С этой целью второй вход второго сумматора (2) через усилитель (А) с коэффициентом передачи  $K_{C1}$  соединен с выходом третьего сумматора (3). Сумматор (3) предназначен для сравнения поступающих на его входы сигналов заданного значения скорости идеального холостого хода асинхронной машины с выхода задатчика (ЗС) скорости и действительной скорости

вращения с выхода датчика (BR) скорости. Датчики (UM) момента и (BR) скорости механически соединены с валом асинхронной машины (M1).

Будем считать, что длительность переходных процессов не менее чем в 30 раз больше времени проводимости отдельных вентилях мостового ведомого сетью инвертора. Тогда, учитывая рекомендации работы [6, с. 46], можно использовать в анализе линейную непрерывную модель инвертора; его дифференциальное уравнение будет иметь вид:

$$\frac{de_{и}}{dt} = \frac{1}{T_{и}} (K_{и}u_{y} - e_{и}), \quad (6)$$

где  $e_{и}$  – среднее значения выпрямленной ЭДС ведомого сетью управляемого инвертора в роторной цепи;  $u_{y}$  – напряжение управления инвертором в роторной цепи;  $T_{и}$  – постоянная времени инвертора в роторной цепи;  $K_{и}$  – коэффициент передачи инвертора в роторной цепи.

Для описания инвертора в статическом режиме приравняем в уравнении (6) производную к нулю. В результате получим уравнение инвертора в следующем виде:

$$E_{и} = K_{и} \cdot u_{y}. \quad (7)$$

На основе уравнения электромагнитного момента (5) и в соответствии с функциональной схемой нагрузочной части стенда, приведенной на рис. 1, с учетом выражений для обратных связей и выражения для мостового инвертора (7) в роторной цепи была составлена система уравнений для статического режима стенда, которая имеет вид:

$$\begin{cases} u_{y} = K_{PM}(-U_{3M} + U_{OCM}) - (\omega_{эл} - \omega_{0эл})K_{C1}; \\ E_{и} = K_{и} \cdot u_{y}; \\ M = K_{эм} \left[ \frac{U'_{1m} \cdot L_{2\Sigma} (\omega_{0эл} - \omega_{эл})}{\omega_{0эл}} - E_{и} \frac{L_{12}}{k_{cx}} \right]; \\ \omega_{эл} = p_{д} \cdot \omega; \\ U_{OCM} = K_{дм} \cdot M; \\ U_{OC\omega} = K_{дс} \cdot \omega. \end{cases} \quad (8)$$

Из (8) получим уравнение механической характеристики стенда с рекуперацией энергии на основе АВК:

$$M = \frac{K_{эм}}{1 + K_{эм} \cdot K_{дм} \cdot K_{PM} \cdot \frac{L_{12} \cdot K_{и}}{k_{cx}}} \left[ U'_{1m} \cdot L_{2\Sigma} + \frac{L_{12} \cdot K_{и}}{k_{cx}} (U_{3M} \cdot K_{PM} - K_{C1} \cdot \omega_{0эл}) + \frac{K_{C1} \cdot L_{12} \cdot K_{и} \cdot \omega_{0эл} - U'_{1m} \cdot L_{2\Sigma} \cdot k_{cx}}{k_{cx} \cdot \omega_{0эл}} \omega_{эл} \right]. \quad (9)$$

Из (9) видно, что для обеспечения инвариантности нагрузочной части, необходимо, чтобы множитель при скорости  $\omega_{эл}$  равнялся нулю:

$$\frac{K_{C1} \cdot L_{12} \cdot K_{и} \cdot \omega_{0эл} - U'_{1m} \cdot L_{2\Sigma} \cdot k_{cx}}{k_{cx} \cdot \omega_{0эл}} = 0. \quad (10)$$

Из (10) выразим значение коэффициента согласования  $K_{C1}$ :

$$K_{C1} = \frac{U'_{1m} \cdot L_{2\Sigma} \cdot k_{cx}}{L_{12} \cdot K_n \cdot \omega_{0эл}}. \quad (11)$$

В результате использования полученного коэффициента согласования  $K_{C1}$ , определяемого выражением (11), достигается статическая инвариантность к скорости нагрузочной части стэнда на основе АВК.

Используя уравнения (1) и (6), получена система уравнений, описывающая нагрузочную часть инвариантного стэнда с рекуперацией энергии на основе АВК в динамике:

$$\begin{cases} \frac{de_n}{dt} = \frac{1}{T_n} (K_n \cdot u_y - e_n); \\ 0 = \frac{R_{2\Sigma}}{L'_{\sigma\Sigma}} \cdot \psi_{2x} + \frac{d\psi_{2x}}{dt} - S \cdot \omega_{0эл} \cdot \psi_{2y} - E_n \frac{1}{k_{cx}}; \\ 0 = \frac{R_{2\Sigma}}{L'_{\sigma\Sigma}} \cdot \psi_{2y} + \frac{U'_{1m} K_1 R_{2\Sigma}}{\omega_{0эл} L'_{\sigma\Sigma}} + \frac{d\psi_{2y}}{dt} + S \cdot \omega_{0эл} \cdot \psi_{2x}; \\ M = \frac{p_d \cdot K_1}{L'_{\sigma\Sigma}} \left( -\frac{U'_{1m}}{\omega_{0эл}} \psi_{2x} \right), \end{cases} \quad (12)$$

где  $K_1 = \frac{L_{12}}{L_1}$  – коэффициент магнитной связи статора;  $L'_{\sigma\Sigma} = \frac{L_1 \cdot L_{2\Sigma} - L_{12}^2}{L_1}$  – эквивалентная индуктивность рассеяния статора;  $S$  – скольжение асинхронной машины, определяемое выражением

$$S = (\omega_{0эл} - \omega_{эл}) / \omega_{0эл}.$$

Система уравнений (12) является нелинейной, так как содержит произведение переменных, поэтому с ее помощью выполнить анализ динамических свойств затруднительно. Поэтому для осуществления перехода к операторной форме и анализа динамических свойств при малых отклонениях переменных необходимо от этих произведений избавиться. С этой целью представим переменные в виде сумм установившихся значений и малых отклонений:

$$\begin{cases} \psi_{2x} = \Psi_{2xнач} + \Delta\psi_{2x}; \\ \psi_{2y} = \Psi_{2yнач} + \Delta\psi_{2y}; \\ S = S_{нач} + \Delta S, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\Psi_{2xнач}$ ,  $\Psi_{2yнач}$ ,  $S_{нач}$  – начальные значения потокосцеплений и скольжения АВК в рабочей точке;  $\Delta\psi_{2x}$ ,  $\Delta\psi_{2y}$ ,  $\Delta S$  – малые отклонения значений потокосцеплений и скольжения АВК.

Для анализа динамических процессов запишем систему уравнений (12) в приращениях с учетом (13), при этом из третьего уравнения системы (13) исключим слагаемое  $(U'_{1m} \cdot K_1) / (\omega_{0эл} \cdot T_{2\Sigma})$ , так как оно относится только к описанию статических режимов. Получим систему уравнений, описывающую динамику инвариантного стэнда с рекуперацией энергии на основе АВК вблизи рабочей точки:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{и} \cdot \Delta u_y = \Delta E_{и} + T_{и} \frac{d\Delta E_{и}}{dt}; \\ 0 = \frac{1}{T_{2\Sigma}} \Delta \Psi_{2x} + \frac{d\Delta \Psi_{2x}}{dt} - \omega_{0эл} \cdot \Psi_{2yнач} \cdot \Delta S - \omega_{0эл} \cdot S_{нач} \cdot \Delta \Psi_{2y} - \Delta E_{и} \frac{1}{k_{сх}}; \\ 0 = \frac{1}{T_{2\Sigma}} \Delta \Psi_{2y} + \frac{d\Delta \Psi_{2y}}{dt} + \omega_{0эл} \Psi_{2xнач} \cdot \Delta S + \omega_{0эл} \cdot S_{нач} \cdot \Delta \Psi_{2x}; \\ \Delta M = -\frac{p_d \cdot K_1 \cdot U'_{1m}}{L'_{\Sigma\Sigma} \cdot \omega_{0эл}} \Delta \Psi_{2x}, \end{array} \right. \quad (14)$$

где  $T_{2\Sigma} = L'_{\Sigma\Sigma} / R_{2\Sigma}$  – эквивалентная суммарная постоянная времени ротора.

Путем замены  $\frac{d}{dt} \rightarrow p$  и  $\int dt \rightarrow \frac{1}{p}$  перейдем к операторной форме и преобразуем систему уравнений к виду, удобному для построения структурной схемы; в результате получим систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta E_{и} = \Delta u_y \frac{K_{и}}{T_{и} \cdot p + 1}; \\ \Delta \Psi_{2x} = \left( \omega_{0эл} \cdot \Psi_{2yнач} \cdot \Delta S + \omega_{0эл} \cdot S_{нач} \cdot \Delta \Psi_{2y} + \Delta E_{и} \frac{1}{k_{сх}} \right) \frac{T_{2\Sigma}}{T_{2\Sigma} \cdot p + 1}; \\ \Delta \Psi_{2y} = \left( -\omega_{0эл} \cdot \Psi_{2xнач} \cdot \Delta S - \omega_{0эл} \cdot S_{нач} \cdot \Delta \Psi_{2x} \right) \frac{T_{2\Sigma}}{T_{2\Sigma} \cdot p + 1}; \\ \Delta M = -\frac{p_d \cdot K_1 \cdot U'_{1m}}{L'_{\Sigma\Sigma} \cdot \omega_{0эл}} \Delta \Psi_{2x}. \end{array} \right. \quad (15)$$

Используя полученную математическую модель нагрузочной части стэнда на основе АВК (15) и функциональную схему нагрузочной части испытательного стэнда на основе АВК (рис. 1), была получена структурная схема нагрузочной части (рис. 2).

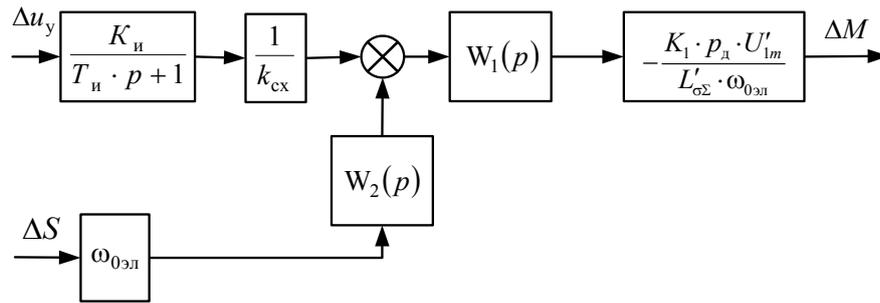


Рис. 2. Структурная схема нагрузочной части стэнда на основе АВК

На схеме обозначено:

$$W_1(p) = \frac{T_{2\Sigma}(T_{2\Sigma} \cdot p + 1)}{\left(1 + (T_{2\Sigma} \cdot \omega_{0эл} \cdot S_{нач})^2\right) \left(T_1^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi_1 \cdot T_1 \cdot p + 1\right)};$$

$$T_1 = \frac{T_{2\Sigma}}{\sqrt{1 + (T_{2\Sigma} \cdot \omega_{0эл} \cdot S_{нач})^2}} - \text{постоянная времени};$$

$$\xi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + (T_{2\Sigma} \cdot \omega_{0эл} \cdot S_{нач})^2}} - \text{коэффициент затухания};$$

$$W_2(p) = \frac{(\Psi_{2y} - T_{2\Sigma} \cdot \omega_{0эл} \cdot S_{нач} \cdot \Psi_{2x})(T_2 \cdot p + 1)}{(T_{2\Sigma} \cdot p + 1)},$$

$$T_2 = \frac{T_{2\Sigma} \cdot \Psi_{2y}}{\Psi_{2y} - T_{2\Sigma} \cdot \omega_{0эл} \cdot S_{нач} \cdot \Psi_{2x}} - \text{постоянная времени.}$$

Используя функциональную схему нагрузочной части (рис. 1) и структурную схему нагрузочной части (рис. 2), с учетом связей для компенсации возмущений по скорости получим структурную схему АВК при инвариантности момента, представленную на рис. 3.

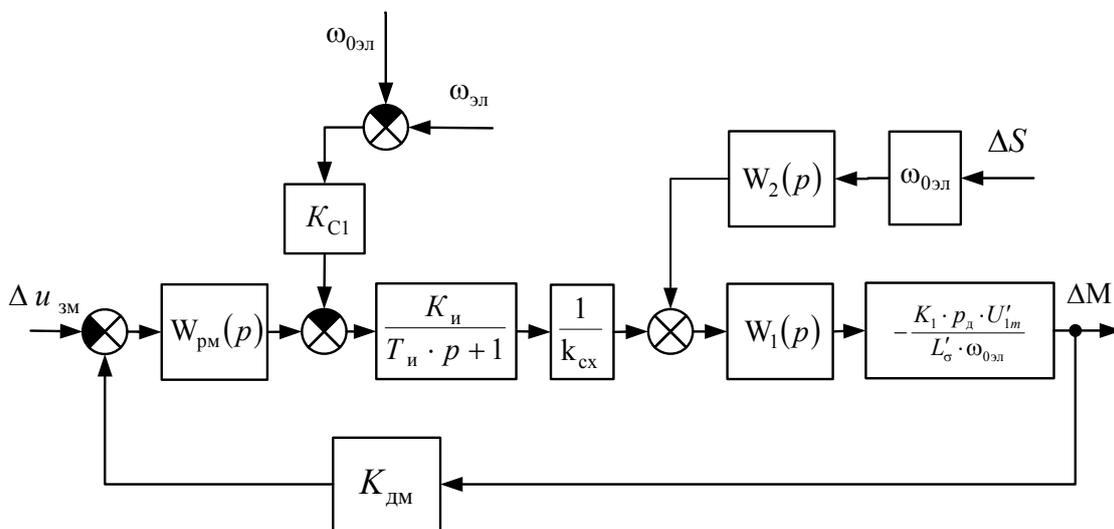


Рис. 3. Структурная схема АВК при инвариантности момента

### Заключение

Инвариантность нагрузочной части стенда на основе АВК по моменту обеспечивается при использовании положительной обратной связи по моменту и отрицательной по скорости. Получено выражение механической статической характеристики нагрузочной части стенда с рекуперацией энергии на основе АВК. Условие статической инвариантности формулируется выражением (10). Для анализа и синтеза электропривода инвариантного электромеханического стенда с рекуперацией энергии на основе АВК целесообразно пользоваться полученной структурной схемой (рис. 3).

### Литература

1. Грейвулис, Я. П. Асинхронно-вентильный каскад с улучшенными энергетическими показателями / Я. П. Грейвулис, И. В. Авкшоль, Л. С. Рыбицкий. – Рига : Зинатне, 1991. – 217 с.
2. Фираго, Б. И. Теория электропривода : учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Палявич. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с.
3. Онищенко, Г. Б. Электрический привод : учеб. для вузов / Г. Б. Онищенко. – М. : РАСХН, 2003. – 320 с.

4. Ковчин, С. А. Теория электропривода : учеб. для вузов / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. – СПб. : Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.
5. Нагрузочное устройство : пат. 16927 С2 Респ. Беларусь, МПК G 01 M 15/00 / В. С. Захаренко, И. В. Дорощенко, В. А. Савельев ; заяв. Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – № а 20101749 ; заявл. 03.12.2010 ; опубл. 30.04.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 2. – С. 128.
6. Егоров, В. Н. Цифровое моделирование систем электропривода / В. Н. Егоров, О. В. Корженевский-Яковлев. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.

*Получено 04.06.2013 г.*