

УДК 62-83: 531.3

**Пропорциональный и пропорционально-интегральный принципы отработки невязки в наблюдателе полного порядка электромеханического объекта с линеаризованной моделью\***

**А.С. ГЛАЗЫРИН**

634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: [asglazyrin@tpu.ru](mailto:asglazyrin@tpu.ru)

Для формирования сигналов обратных связей в регулируемом электроприводе применение датчиков угловой скорости в ряде случаев является технически нецелесообразным, при этом используют наблюдатели, которые на основе сигналов от датчиков тока и напряжения и математической модели двигателя восстанавливают оценки необходимых сигналов. При построении наблюдателя полного порядка формируется сигнал невязки между измеренным током и оценкой тока, полученной в наблюдателе. Используя сигнал невязки, в наблюдатель вводят корректирующие сигналы, которые возможно преобразовать согласно пропорциональному (П-принципу) и пропорционально-интегральному (ПИ-принципу) принципам. Введение пропорционального сигнала в сумматор, выход которого непосредственно влияет на динамику тока в наблюдателе, позволяет компенсировать рассогласование начальных условий в наблюдателе и наблюдаемом объекте. Введение пропорционального сигнала невязки на вход сумматора механической подсистемы позволяет значительно уменьшить динамическую ошибку при набросе/сбросе нагрузки, однако попытки уменьшить статическую ошибку по возмущению приводят к появлению колебательности в сигнале оценки угловой скорости и даже к потере устойчивости наблюдателя. Введение пропорционально-интегральной связи на вход сумматора механической подсистемы позволяет значительно уменьшить динамическую ошибку по возмущению и полностью исключить статическую ошибку. Приведенная методика расчета граничного коэффициента усиления невязки в контуре регулирования оценки тока и рекомендации по выбору постоянной времени ПИ-связи позволяют осуществить предварительную настройку наблюдателя перед началом математического моделирования. Работоспособность наблюдателя и влияние пропорциональных и пропорционально-интегральных связей на динамику были проверены путем математического моделирования.

**Ключевые слова:** наблюдатель полного порядка, двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, невязка, пропорциональный принцип, пропорционально-интегральный принцип, настройка коэффициентов, начальные условия, компенсация момента сопротивления нагрузки, математическое моделирование

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-1-28-39

---

\* Статья получена 31 июля 2014 г.

## ВВЕДЕНИЕ

В большинстве современных производственных механизмов исходя из требований технологического процесса требуются замкнутые контуры управления как по угловой скорости или положению вала двигателя, так и по технологическим переменным – давлению, расходу и т. п. Однако применение датчиков механических и магнитных переменных нецелесообразно, так как их установка увеличит время наладки и эксплуатационные расходы, а также снизит вероятность безотказной работы электропривода из-за возможных отказов этих датчиков. В этом случае следует переходить на так называемый «бездатчиковый электропривод» (БЭП), имеющий в своем составе идентификаторы параметров и наблюдатели состояния, в последние два десятилетия получивший распространение в мире и в России, название же заимствовано от дословного перевода с английского «Sensorless control of motor drive», которое встречается в многочисленных англоязычных публикациях.

Проблема внедрения БЭП для автоматизации большинства общепромышленных механизмов является одной из важнейших для дальнейшей автоматизации технологических процессов и промышленных установок, снижения себестоимости и повышения конкурентоспособности отечественной промышленной продукции.

Существенный вклад в решение проблем построения наблюдателей и совершенствования БЭП внесли ведущие российские и зарубежные ученые, среди которых D.G. Luenberger [1], R.E. Kalman [2], B.K. Bose [3], H.A. Toliyat [4], K. Matsuse [5], G.M. Asher [6], А.Б. Виноградов [7], В.В. Панкратов [8], А.А. Воевода [9], В.Г. Каширских [10], В.М. Завьялов [11], И.Я. Браславский [12], А.М. Зюзев [12, 13] и другие [14–16].

Несмотря на значительные достижения в области теории идентификации параметров и оценки вектора состояния регулируемых электродвигателей, остаются недостаточно изученными вопросы сравнительного анализа пропорционального и пропорционально-интегрального принципов обработки сигналов невязки в наблюдателях полного порядка. В качестве регулируемого электромеханического объекта для наблюдения выберем двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ), а выявленные закономерности в той или иной степени можно в дальнейшем будет распространить и на электродвигатели переменного тока.

### **1. ЛИНЕАРИЗОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ КАК РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА**

Система дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши для описания динамики наблюдаемого объекта ДПТ НВ при условии постоянства потока возбуждения

$$\begin{cases} \frac{di(t)}{dt} = \frac{U(t) - i(t) \cdot R_{\text{Я}} - \omega(t) \cdot c_{\text{ДВ}}}{L_{\text{Я}}}, \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{i(t) \cdot c_{\text{ДВ}} - M_{\text{С}}(t)}{J_{\text{ДВ}}}, \end{cases}$$

где  $U(t)$ ,  $i(t)$ ,  $\omega(t)$  – напряжение, ток и угловая скорость якоря,  $R_{\text{Я}}$ ,  $L_{\text{Я}}$ ,  $J_{\text{Я}}$ ,  $c_{\text{ДВ}}$  – сопротивление, индуктивность, момент инерции якоря, электромеханический коэффициент ДПТ НВ.

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ ОТРАБОТКИ СИГНАЛА НЕВЯЗКИ

При построении наблюдателя скорости ДПТ НВ в распоряжении разработчика имеются сигналы, поступающие от датчиков напряжения и тока  $i_{\text{Я}}(t)$  якорной цепи, а рассчитывается при этом оценка угловой скорости вращения якоря  $\hat{\omega}(t)$  (рис. 1). В качестве входного сигнала рассматриваемой динамической системы принимаем  $U_{\text{Я}}(t)$ , а в качестве отклика –  $i_{\text{Я}}(t)$ . Все координаты наблюдателя, как это принято к теории автоматического управления, обозначаются так же, как и у наблюдаемого динамического объекта, но сверху добавляется специальный знак; оценка тока якоря обозначается как  $\hat{i}(t)$ .

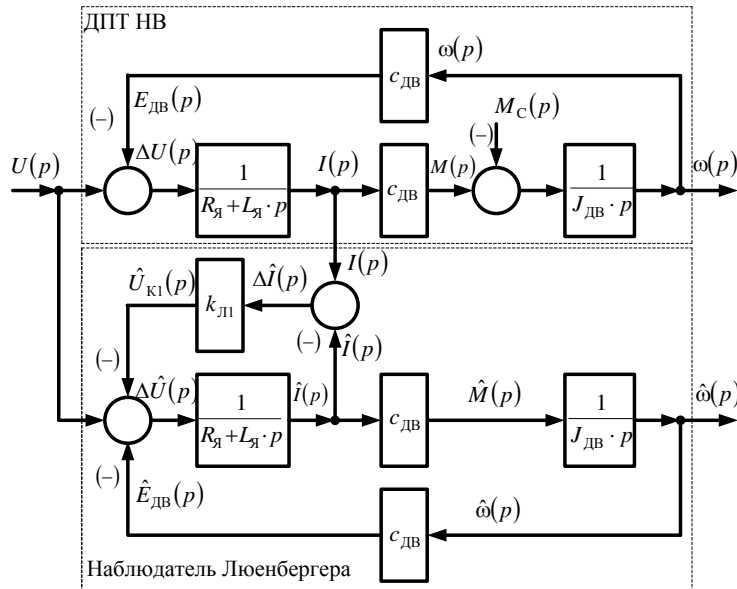


Рис. 1. Структурная схема ДПТ НВ с наблюдателем Льюенбергера полного порядка и усилением невязки по П-принципу

Система дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши для описания динамики наблюдателя ДПТ НВ с П-принципом отработки невязки

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}(t)}{dt} = \frac{U(t) - i(t) \cdot R_{\text{Я}} - (i(t) - \hat{i}(t)) \cdot k_{\text{ЛП}} - \hat{\omega}(t) \cdot c_{\text{ДВ}}}{L_{\text{Я}}}, \\ \frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} = \frac{\hat{i}(t) \cdot c_{\text{ДВ}}}{J_{\text{ДВ}}}, \end{cases}$$

где  $k_{\text{ЛП}}$  – пропорциональный коэффициент отработки невязки.

При разработке классических наблюдателей Люенбергера полного порядка невязка  $\Delta\hat{i}(t) = i(t) - \hat{i}(t)$  обрабатывается по пропорциональному принципу (П-принципу). На рис. 1 показана структурная схема рассматриваемого наблюдателя полного порядка для ДПТ НВ. Покажем достоинства и недостатки такого подхода.

### 3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГРАНИЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ НЕВЯЗКИ В КОНТУРЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОЦЕНКИ ТОКА

Идея настройки наблюдателя полного порядка ДПТ НВ заключается в применении принципа отработки системой управляющих (при  $M_{\text{С}} = 0$ ) и возмущающих воздействий (при  $U = \text{const}$ ). Кроме того, для тестирования качества работы наблюдателя в динамике следует применять рассогласование начальных условий.

Произведем преобразование структурной схемы, приведенной на рис. 1, с целью упрощения дальнейших выкладок (рис. 2).

Для определения передаточной функции невязки наблюдателя по управлению

$$W_{U, \Delta\hat{i}}(p) = \frac{\Delta\hat{i}(p)}{U(p)} \quad (1)$$

и, соответственно, ее минимизации необходимо выразить невязку  $\Delta\hat{i}(p)$  через входное напряжение и передаточную функцию ДПТ НВ:

$$W_{\text{ДВ}}(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{1}{R_{\text{Я}} + L_{\text{Я}} \cdot p + \frac{c_{\text{ДВ}}^2}{J_{\text{ДВ}} \cdot p}} = \frac{1}{R_{\text{Я}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L_{\text{Я}}}{R_{\text{Я}}} \cdot p + \frac{1}{\frac{J_{\text{ДВ}} \cdot R_{\text{Я}}}{c_{\text{ДВ}}^2} \cdot p}}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{ЯЦ}} = \frac{L_{\text{Я}}}{R_{\text{Я}}}$  – электромагнитная постоянная времени ДПТ НВ,

$T_{\text{МЕХ}} = \frac{J_{\text{ДВ}} \cdot R_{\text{Я}}}{c_{\text{ДВ}}^2}$  – электромеханическая постоянная времени ДПТ НВ.

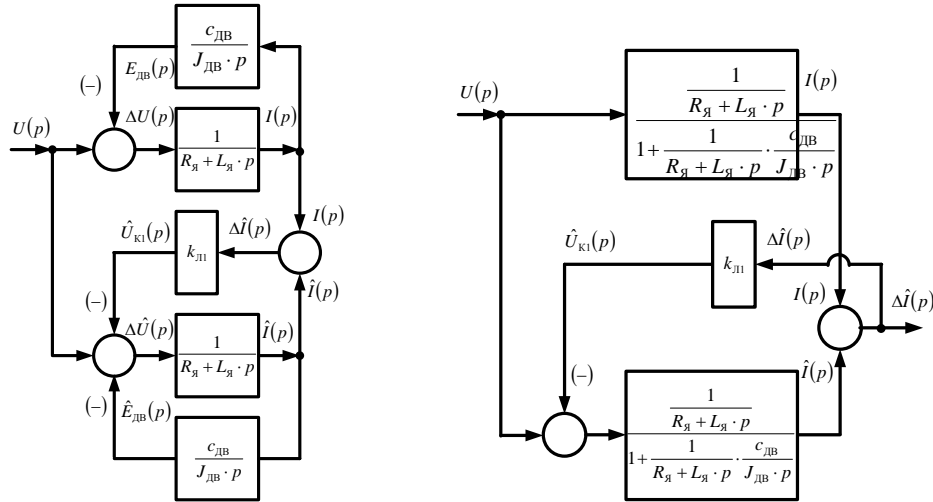


Рис. 2. Эквивалентные преобразования структурной схемы ДПТ НВ и наблюдателя

Итак, принимаем передаточную функцию усилителя невязки как  $W_{Л1}(p) = k_{Л1}$  согласно (2):

$$\begin{aligned}
 \Delta \hat{I}(p) &= I(p) - \hat{I}(p) \Rightarrow \{I(p) = U(p) \cdot W_{ДВ}(p)\} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \hat{I}(p) = I(p) - \Delta \hat{I}(p) = U(p) \cdot W_{ДВ}(p) - \Delta \hat{I}(p) \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \hat{I}(p) = (U(p) - U_{К1}(p)) W_{ДВ}(p) = \\
 &= (U(p) - W_{Л1}(p) \cdot \Delta \hat{I}(p)) W_{ДВ}(p) \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \Delta \hat{I}(p) = U(p) \cdot W_{ДВ}(p) - (U(p) - W_{Л1}(p) \cdot \Delta \hat{I}(p)) W_{ДВ}(p) = \quad (3) \\
 &= W_{ДВ}(p) \{U(p) - U(p) + W_{Л1}(p) \cdot \Delta \hat{I}(p)\} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \Delta \hat{I}(p) = W_{ДВ}(p) \cdot W_{Л1}(p) \cdot \Delta \hat{I}(p) \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \Delta \hat{I}(p) (1 - W_{ДВ}(p) \cdot W_{Л1}(p)) = 0 \Rightarrow \\
 &\Rightarrow W_{Л1}(p) = \frac{1}{W_{ДВ}(p)} = R_{Я} + L_{Я} p + \frac{c_{ДВ}^2}{J_{ДВ} p}.
 \end{aligned}$$

Учитывая, что наблюдатель построен с использованием П-принципа отработки невязки, отбросим дифференциальную и интегральную части полученного в (3) результата и получим приближенное значение граничного коэффициента (ГР) усиления невязки наблюдателя

$$k_{Л1.ГР} = R_{Я}.$$

При настройке наблюдателя рекомендуется принимать

$$k_{Л1} = k_{ЗП.Л1} \cdot k_{Л1.ГР} = k_{ЗП.Л1} \cdot R_{Я}, \quad (4)$$

где  $k_{ЗП.Л1} = 0,25 \dots 0,95$  – коэффициент запаса устойчивости наблюдателя.

### 3. ОТРАБОТКА НЕСОГЛАСОВАННОСТИ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ И НАБРОСА НАГРУЗКИ В НАБЛЮДАТЕЛЕ СКОРОСТИ ДПТ НВ БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ

Проведем исследование динамики наблюдателя, структурная схема которого изображена на рис. 1, на примере двигателя постоянного тока независимого возбуждения 2ПБ112ЛГУХЛ4 с номинальными мощностью  $P_H = 2$  кВт, напряжением  $U_H = 220$  В, частотой вращения ротора  $n_H = 3150$  об/мин, КПД  $\eta = 81\%$ , суммарной индуктивностью якорной цепи  $L_{ДВ} = 7,1$  мГн, суммарным сопротивлением якорной цепи  $R_{ДВ} = 1,022$  Ом, эквивалентным моментом инерции  $J_{ДВ} = 0,018$  кг·м<sup>2</sup>.

Как показали исследования динамики (рис. 3), наблюдатель скорости ДПТ НВ без компенсации момента сопротивления асимптотически устойчив при условии выбора коэффициента усиления невязки согласно (4), в частности при  $k_{ДП} = 0,75 \cdot R_{Я}$  (рис. 3, а).

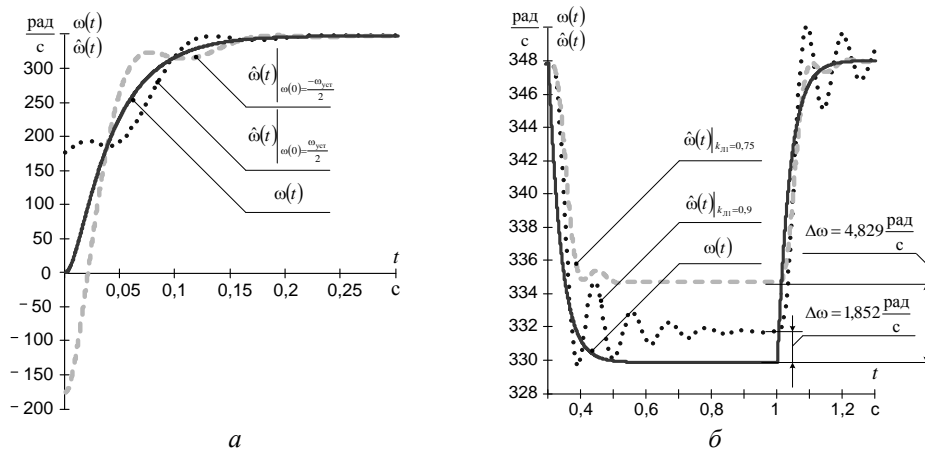


Рис. 3. Отработка несогласованности начальных условий (а) и наброса/сброса нагрузки (б) в наблюдателе скорости ДПТ НВ без компенсации момента сопротивления

Наблюдатель имеет значительную статическую ошибку при набросе нагрузки (рис. 3, б), которую удастся уменьшить путем увеличения  $k_{ДП}$ , однако при этом увеличивается колебательность, уменьшается запас устойчивости, а при значительном увеличении коэффициента и при нарушении рекомендации (4) наблюдатель становится неустойчивым.

### 4. ВВЕДЕНИЕ В НАБЛЮДАТЕЛЬ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ СВЯЗИ, КОМПЕНСИРУЮЩЕЙ НАГРУЗКУ

Уменьшить статизм наблюдателя скорости ДПТ НВ, структура которого приведена на рис. 1, можно путем введения дополнительной связи, компенсирующей отсутствующий сигнал по моменту нагрузки в системе (рис. 4).

Как видно из рис. 4, сигнал  $\hat{M}(p)$ , компенсирующий недостаток информации в наблюдателе о текущем моменте нагрузки на валу, формируется по П-принципу, т. е. невязку по току  $\Delta\hat{I}(p)$  следует умножить на  $k_{Л2}$ , учитывая, что  $M(p) = c_{ДВ} \cdot I(p)$  – коэффициент усиления невязки  $k_{Л2}$  – имеет такую же размерность, как  $c_{ДВ}$ , и рассчитывается как

$$k_{Л2} = k_{УС.Л2} \cdot c_{ДВ}, \quad (5)$$

где  $k_{УС.Л2} = 10 \dots 25$  – коэффициент пропорционального усиления невязки по току.

На примере двигателя, рассмотренного выше, продемонстрируем (рис. 5) поведение наблюдателя при введении связи, компенсирующей на основе П-принципа момент нагрузки с коэффициентом  $k_{Л2} = 10 \cdot c_{ДВ}$  при тех же коэффициентах  $k_{Л1} = 0,75$  и  $k_{Л1} = 0,9$ .

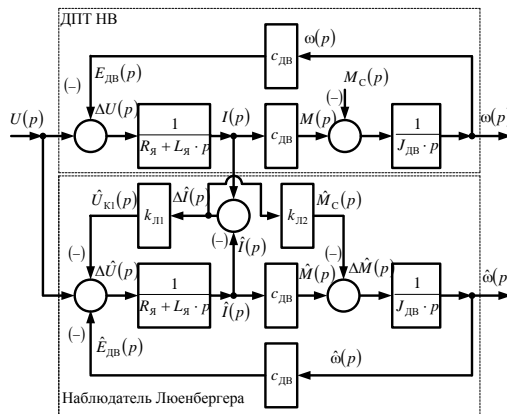


Рис. 4. Структурная схема ДПТ НВ с наблюдателем Льюенбергера полного порядка: усиление невязки и компенсация момента сопротивления нагрузки по П-принципу

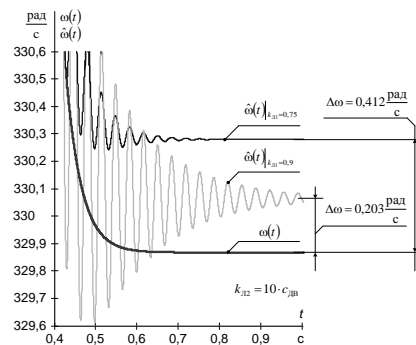


Рис. 5. Обработка наброса нагрузки наблюдателем с усилением невязки и компенсацией момента сопротивления нагрузки по П-принципу

Следует отметить, что введение на основе П-принципа в наблюдатель компенсирующей связи по моменту сопротивления уменьшает статическую ошибку для приведенного примера при  $k_{Л1} = 0,75$  в

$$\frac{4,829}{0,412} = 11,721 \text{ раза,}$$

а при  $k_{Л1} = 0,9$  в

$$\frac{1,852}{0,203} = 9,123 \text{ раза,}$$

однако полностью избавиться от статической ошибки в наблюдателе не удалось.

### 5. НАБЛЮДАТЕЛЬ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ ОТРАБОТКИ СИГНАЛА НЕВЯЗКИ

Наблюдатели полного порядка являются динамическими объектами, позволяющими получать асимптотически устойчивые оценки скорости, однако воздействие момента сопротивления на ДПТ НВ при набросе нагрузки и отсутствии датчика момента приводит к появлению статической ошибки, которую можно уменьшить, но нельзя исключить. Для исключения статической ошибки оценивания скорости ДПТ НВ предлагается ввести в наблюдатель контур, компенсирующий отсутствие сигнала о моменте нагрузки на валу (рис. 6), при этом невязка по току должна обрабатываться по пропорционально-интегральному принципу (ПИ-принципу).

В структуре наблюдателя (рис. 6), в основном повторяющей структуру ДПТ НВ, введен сигнал  $\hat{U}_{К2}(p)$ , корректирующий динамику переменной состояния  $\hat{\omega}(p)$ , который является оценкой  $\hat{M}_C(p)$  момента сопротивления на валу и определяется как

$$\hat{U}_{К2}(p) = \hat{M}_C(p) = \hat{U}_{Л2.П}(p) + \hat{U}_{Л2.И}(p),$$

где  $\hat{U}_{Л2.П}(p) = \Delta \hat{I}(p) \cdot k_{Л2}$  – пропорциональная часть оценки  $\hat{M}_C(p)$ ;

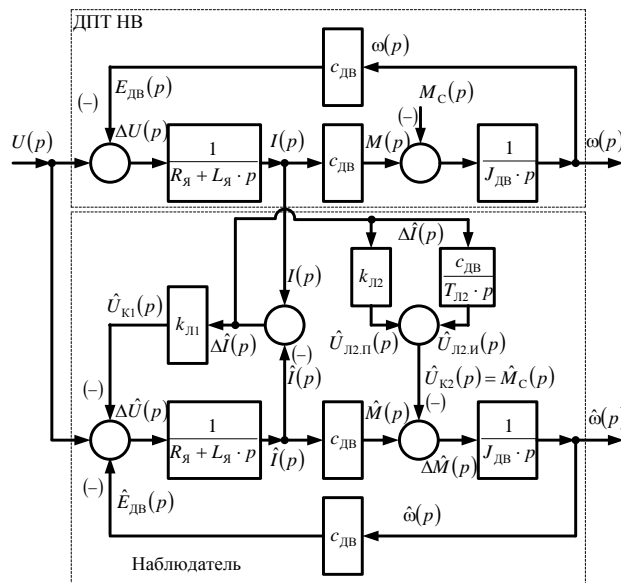


Рис. 6. Структурная схема ДПТ НВ с наблюдателем Люенбергера полного порядка с компенсацией момента сопротивления нагрузки по ПИ-принципу

$\hat{U}_{Л2.И}(p) = \Delta \hat{I}(p) \cdot c_{ДВ} \frac{1}{T_{Л2} \cdot p}$  – интегральная часть оценки  $\hat{M}_C(p)$ ;  $T_{Л2}$  – постоянная времени корректирующего звена ПИ-типа, которую предлагается



принять равной электромагнитной постоянной времени якорной цепи ДПТ НВ

$$T_{Л2} = T_{ЯЦ} = \frac{L_{Я}}{R_{Я}}.$$

Покажем на примере двигателя 2ПБ112ЛГУХЛ4, параметры которого приведены выше, отработку наблюдателем скорости полного порядка рассогласования начальных условий динамических режимов ДПТ НВ и наблюдателя (рис. 7) и наброса нагрузки (рис. 8) при  $k_{Л1} = 0,5 \cdot R_{Я}$ ,  $k_{Л2} = 10 \cdot c_{ДВ}$ ,  $T_{Л2} = L_{Я}/R_{Я}$ .

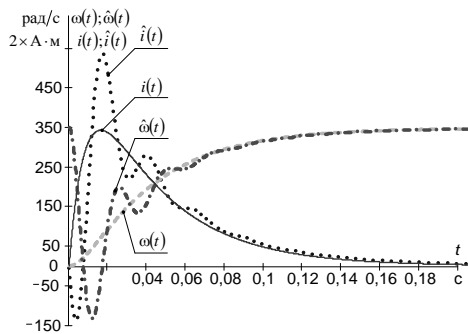


Рис. 7. Отработка несогласованности начальных условий наблюдателем полного порядка ДПТ НВ с ПИ-принципом усиления невязки

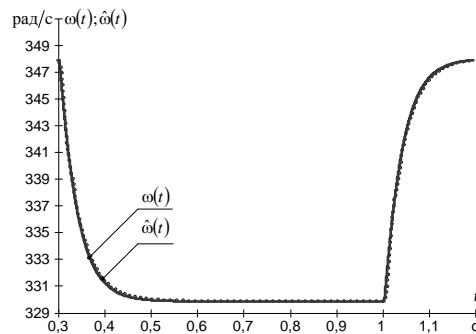


Рис. 8. Отработка наброса нагрузки наблюдателем полного порядка ДПТ НВ с ПИ-принципом усиления невязки

Наблюдатель скорости полного порядка ДПТ НВ с ПИ-принципом усиления невязки является асимптотически устойчивым и не имеет статической ошибки по возмущению (рис. 7 и 8). Кроме того, следует отметить, что порядок наблюдателя, определяемый по количеству переменных состояния, больше порядка наблюдаемого динамического объекта ДПТ НВ на единицу за счет введения дополнительной переменной состояния. В связи с этим рассмотренный в этом параграфе наблюдатель следует классифицировать как наблюдатель Люенбергера, расширенный по вектору состояния.

Приведенный материал позволяет лучше понять основные предпосылки для разработки наблюдателей полного порядка и для других регулируемых электродвигателей, например для асинхронных в системах полеориентированного управления.

## ВЫВОДЫ

Пропорциональная компенсирующая связь в наблюдателе на вход сумматора, непосредственно влияющего на процесс изменения сигнала оценки тока, позволяет устранить рассогласование начальных условий в наблюдателе и наблюдаемом объекте. Вводить более сложную пропорционально-интегральную связь при этом не требуется.

Пропорциональная компенсирующая связь в наблюдателе на вход сумматора механической подсистемы позволяет существенно снизить динамиче-

скую ошибку по возмущению. Попытки полного устранения этой ошибки приводят к появлению колебательности в сигнале оценки угловой скорости и даже к потере устойчивости наблюдателя.

Пропорционально-интегральная компенсирующая связь на вход сумматора механической подсистемы наблюдателя позволяет при правильной настройке коэффициентов и постоянной времени практически полностью устранить как динамическую, так и статическую ошибки оценки угловой скорости, вызванные неконтролируемым изменением момента сопротивления нагрузки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Luenberger D.G.* Observing the state of a linear system // IEEE Transactions on Military Electronics. – 1964. – Vol. 8, iss. 2. – P. 74–80. – doi: 10.1109/TME.1964.4323124.
2. *Kalman R.E., Bucy R.S.* New results in linear filtering and prediction // Transactions of the ASME. Ser. D, Journal of Basic Engineering. – 1961. – Vol. 83, iss. 1. – P. 95–108. – doi: 10.1115/1.3658902.
3. *Bose B.K.* Modern power electronics and AC drives. – New Jersey: Prentice-Hall, 2002. – 711 p.
4. Speed observer system for advanced sensorless control of induction motor / H. Abu-Rub, J. Guzinski, Z. Krzeminski, H.A. Toliyat // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2003. – Vol. 18, iss. 2. – P. 219–224. – doi: 10.1109/TEC.2003.811735.
5. Characteristics of speed sensorless vector controlled dual induction motor drive connected in parallel fed by a single inverter / K. Matsuse, H. Kawai, Y. Kouno, J. Oikawa // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2004. – Vol. 40, iss. 1. – P. 153–161. – doi: 10.1109/TIA.2003.821805.
6. *Ohyama K., Asher G.M., Sumner M.* Comparative analysis of experimental performance and stability of sensorless induction motor drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2005. – Vol. 53, iss. 1. – P. 178–186. – doi: 10.1109/TIE.2005.862298.
7. *Виноградов А.Б., Сибирцев А.Н., Журавлев С.В.* Бездатчиковый электропривод подъемно-транспортных механизмов // Силовая электроника. – 2007. – № 1. – С. 46–52.
8. *Вдовин В.В., Панкратов В.В.* Синтез адаптивного наблюдателя координат бездатчикового асинхронного электропривода // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 4. – С. 147–153.
9. *Воевода А.А., Трошина Г.В.* Оценивание параметров моделей динамики и наблюдения для линейных стационарных дискретных систем с использованием информационной матрицы Фишера // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 3 (24). – С. 199–200.
10. *Каширских В.Г.* Динамическая идентификация параметров и управление состоянием электродвигателей приводов горных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03. – Кемерово, 2005. – 356 с.
11. *Завьялов В.М.* Управление динамическим состоянием асинхронных электроприводов горных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03. – Кемерово, 2009. – 327 с.
12. Синтез нейронного наблюдателя для асинхронного привода с прямым управлением момента / И.Я. Браславский, А.М. Зюзев, З.Ш. Ишматов, М.А. Аверьянов, Е.И. Барац, А.В. Костылев // Электротехника. – 2001. – № 12. – С. 31–34.
13. *Зюзев А.М., Нестеров К.Е.* Методы косвенной оценки скорости двигателей в системах ТПН-АД // Электротехника. – 2009. – № 9. – С. 45–49.
14. *Timoshkin V.V., Glazyrin A.S., Kozlova L.E.* Reasoning of the use of TVR-IM electric drives of closed-loop type by the angular velocity observer for solving technological problems // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 131–135. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.131.
15. *Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Polishchuk V.I.* Induction motor drive parameters identification applying difference schemes // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 65–68. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.65.
16. *Tkachuk R.Y., Glazyrin A.S., Polishchuk V.I.* Induction motor drives parameters identification using genetic algorithms // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST–2012), Tomsk, September 18–21, 2012: proceedings: in 2 vol. – Tomsk: TPU Press, 2012. – Vol. 2. – P. 586–589.

Глазырин Александр Савельевич, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – методы идентификации параметров и переменных состояния электромеханических преобразователей энергии. E-mail: [asglazyrin@tpu.ru](mailto:asglazyrin@tpu.ru)

***Proportional and proportional-integral principles of testing the observer error in a full-order state observer applying a linearized model of an electromechanical object \****

A.S. GLAZYRIN

*National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave., Tomsk, 634034, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: [asglazyrin@tpu.ru](mailto:asglazyrin@tpu.ru)*

Using speed sensors to generate a feedback signal in electric drives with a control system is usually technically impractical. In this case observers are used to recover the necessary signal estimates based on current and voltage sensor signals and a mathematical model of the motor. When creating a full-order state observer, an observer error is generated based on the difference of the measured current and the estimate of the current obtained by the observer. Corrective signals are entered applying an observer error of the full-order state observer. These corrective signals can be converted in accordance with the proportional (P-principle) and proportional-integral (PI principle) principles. Entering a proportional signal into the summator whose output has a direct impact on the dynamics of the current estimate in the observer can compensate for the misalignment of the initial conditions in the observer and the observed object. Entering a proportional observer error signal into the input of the mechanical subsystem summator can significantly reduce a dynamic error during loading up and loading down of the motor. However, attempts to reduce a load static error lead to oscillations in the angular speed estimate signal and even to an observer stability loss. Inserting the proportional-integral circuit into the input of the mechanical subsystem summator can significantly reduce dynamic load errors and completely eliminate static errors. This method of the observer error gain coefficient calculation in the control circuit of the current estimate and some recommendations on choosing the PI-circuit time constant are presented. These recommendations make it possible to preset the observer before carrying out mathematical simulation. The efficiency of the observer and the effect of the proportional and the proportional-integral circuits on the dynamics have been verified by simulation. Some conclusions and recommendations are made.

**Keywords:** full-order state observer, DC motor, observer error, proportional principle, proportional-integral principle, gain coefficient setting, initial condition, load compensation, mathematical simulation

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-1-28-39

## REFERENCES

1. Luenberger D.G. Observing the state of a linear system. *IEEE Transactions on Military Electronics*, 1964, vol. 8, iss. 2, pp. 74–80. doi: 10.1109/TME.1964.4323124
2. Kalman R.E., Bucy R.S. New results in linear filtering and prediction. *Transactions of the ASME. Series D, Journal of Basic Engineering*, 1961, vol. 83, iss. 1, pp. 95–108. doi: 10.1115/1.3658902
3. Bose B.K. *Modern power electronics and AC drives*. New Jersey, Prentice-Hall, 2002. 711 p.
4. Abu-Rub H., Guzinski J., Krzeminski Z., Toliyat H.A. Speed observer system for advanced sensorless control of induction motor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2003, vol. 18, iss. 2. – pp. 219–224. doi: 10.1109/TEC.2003.811735

---

\* Received 31 July 2014.

5. Matsuse K., Kawai H., Kouno Y., Oikawa J. Characteristics of speed sensorless vector controlled dual induction motor drive connected in parallel fed by a single inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, vol. 40, iss. 1, pp. 153–161. doi: 10.1109/TIA.2003.821805
6. Ohyama K., Asher G.M., Sumner M. Comparative analysis of experimental performance and stability of sensorless induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, vol. 53, iss. 1, pp. 178–186. doi: 10.1109/TIE.2005.862298
7. Vinogradov A.B., Sibirtsev A.N., Zhuravlev S.V. Bezdatchikovyi elektroprivod pod"emno-transportnykh mekhanizmov [Sensorless electric hoisting mechanisms]. *Silovaya elektronika – Power electronics*, 2007, no. 1, pp. 46–52.
8. Vdovin V.V., Pankratov V.V. Sintez adaptivnogo nablyudatelya koordinat bezdatchikovogo asinkhronnogo elektroprivoda [Synthesis of adaptive coordinate observer of sensorless induction motor drive]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 147–153.
9. Voevoda A.A., Troshina G.V. Otsenivanie parametrov modelei dinamiki i nablyudeniya dlya lineinykh statsionarnykh diskretnykh sistem s ispol'zovaniem informatsionnoi matritsy Fishera [Estimation of the parameters of the dynamics and observation models for linear time-invariant discrete-time systems using the Fisher information matrix] *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 3 (24), pp. 199–200.
10. Kashirskikh V.G. *Dinamicheskaya identifikatsiya parametrov i upravlenie sostoyaniem elektrodvigatelya privodov gornykh mashin*. Diss. ... dokt. tekhn. nauk [Dynamic parameter identification and state management of electric drives of mining machines. Dr. eng. sci. diss.]. Kemerovo, 2005. 356 p.
11. Zav'yalov V.M. *Upravlenie dinamicheskim sostoyaniem asinkhronnykh elektroprivodov gornykh mashin*. Diss. ... dokt. tekhn. nauk [Management of the dynamic state of asynchronous electric mining machinery. Dr. eng. sci. diss.]. Kemerovo, 2009. 327 p.
12. Braslavskii I.Ya., Zyuzev A.M., Ishmatov Z.Sh., Aver'yanov M.A., Barats E.I., Kostylev A.V. Sintez neironnogo nablyudatelya dlya asinkhronnogo privoda s pryamym upravleniem momenta [Synthesis of a neuron estimator for asynchronous drive with direct control of momentum]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2001, no. 12, pp. 31–34. (In Russian)
13. Zyuzev A.M., Nesterov K.E. Metody kosvennoi otsenki skorosti dvigatelya v sistemakh TPN-AD [Methods of indirect estimation of motor velocity in VTC-IM systems]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2009, no. 9, pp. 45–49. (In Russian)
14. Timoshkin V.V., Glazyrin A.S., Kozlova L.E. Reasoning of the use of TVR-IM electric drives of closed-loop type by the angular velocity observer for solving technological problems. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 131–135. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.131
15. Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Polishchuk V.I. Induction motor drive parameters identification applying difference schemes. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 65–68. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.65
16. Tkachuk R.Y., Glazyrin A.S., Polishchuk V.I. Induction motor drives parameters identification using genetic algorithms. *7th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2012)*, Tomsk, Russia, September 18–21, 2012: proceedings: in 2 vol. Tomsk, TPU Press, 2012, vol. 2, pp. 586–589.