

УДК 621.333.3

## РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А.А. Шавёлкин, проф., д.т.н., И.А. Костенко, ассист.,  
Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова

*Аннотация.* Рассмотрена реализация режима ослабления поля двигателя постоянного тока, смешанного возбуждения при шунтировании последовательной обмотки возбуждения и регулировании тока независимой обмотки. Показана эффективность использования регулирования только тока независимой обмотки без шунтирования последовательной обмотки. Предложена схема электропривода, ее работоспособность подтверждают результаты моделирования.

*Ключевые слова:* ослабление поля, импульсный преобразователь, тяговый электропривод, гистерезисный регулятор, источник тока, регулятор ЭДС.

## РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ОСЛАБЛЕННЯ ПОЛЯ В ТЯГОВОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

О.О. Шавьолкін, проф., д.т.н., І.О. Костенко, асист.,  
Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова

*Анотація.* Розглянуто реалізацію режиму послаблення поля двигуна постійного струму змішаного збудження під час шунтування послідовної обмотки збудження та регулювання струму незалежної обмотки. Показано ефективність використання регулювання тільки струму незалежної обмотки без шунтування послідовної обмотки. Запропоновано схему електроприводу, її працездатність підтверджують результати моделювання.

*Ключові слова:* ослаблення поля, імпульсний перетворювач, тяговий електропривід, гістерезисний регулятор, джерело струму, регулятор ЕРС.

## REALIZATION OF THE MODE OF WEAKENING OF A MAGNETIC FIELD IN THE TRACTION DC ELECTRIC DRIVE

A. Shavelkin, Prof., D. Sc. (Eng.), I. Kostenko, T. Asst.,  
Kharkiv National University of after O. Beketov

*Abstract.* The possibilities of implementing the mode of weakening of the DC motors field with compound excitation with bypass series excitation and regulation of current of independent winding are considered. The efficiency of use of regulation of only the current of independent winding without bypass series winding is shown. A scheme of the electric drive is offered; its working capacity is confirmed by the results of modeling.

*Key words:* field weakening, DC-DC converter, traction electric drive, hysteresis controller, current source, EMF controller.

### Введение

Полный переход на асинхронный или вентильный тяговый электропривод (ТЭП) в городском электротранспорте неизбежен и позволяет повысить технико-экономические

и эксплуатационные показатели. Однако на данный момент в существующем парке транспортных средств (ТС) городского электротранспорта преобладающее применение находит тяговый электропривод с двигателями постоянного тока (ДПТ). Для троллейбу-

сов базовым является решение с ДПТ смешанного возбуждения. Существенное улучшение характеристик ТЭП с ДПТ достигается при использовании импульсного регулирования напряжения якоря. Это решение хорошо зарекомендовало себя в современных моделях ТС.

С учетом сложившейся экономической ситуации на Украине актуальной задачей является модернизация ТЭП транспортных средств, еще не выработавших свой ресурс. При минимальных затратах это позволит существенно снизить энергопотребление и повысить эффективность эксплуатации существующих ТС.

### Анализ публикаций

При модернизации ТЭП важным вопросом является реализация режима ослабления поля (ОП) ДПТ. Традиционным решением является использование шунтирования последовательной обмотки возбуждения (ПОВ) при значительных потерях энергии в реостатах [1, 2]. При наличии независимой обмотки возбуждения (НОВ) на первой ступени ОП снижается ток возбуждения (примерно до 30 % от номинального значения). Снижения потерь можно достигнуть применением для шунтирования полупроводниковых ключей [3, 4] с возможностью использования энергии, отводимой из цепи ПОВ [3]. Следует отметить, что в современных ТЭП с импульсным регулированием от этой проблемы ушли, используя ДПТ смешанного и последовательного возбуждения как ДПТ независимого возбуждения [5]. При этом последовательная обмотка возбуждения используется как независимая обмотка с питанием ее от контактной сети посредством отдельного импульсного преобразователя напряжения. Независимая обмотка возбуждения ДПТ вовсе не используется. Даже при форсировании тока ПОВ (в пределах допустимых значений) это означает недоиспользование ДПТ по магнитному потоку и мощности. Так, при полной массе троллейбуса ЛАЗ Е301D1 [5] 30000 кг мощность двигателей 280 кВт, в то время как троллейбус типа ЗИУ-9 с полной массой 16500 кг имеет ДПТ мощностью 110 кВт. Отметим, что преобразователь для цепи ПОВ такой же, как и для цепи якоря, выполняется на мощных IGBT и характеризуется значительными потерями энергии в ключах. Вместе с тем возможности использования НОВ в стандартной схеме включения ДПТ смешанного возбуждения

для реализации режима ослабления поля исследованы недостаточно. Решение этого вопроса при незначительной мощности преобразователя в цепи НОВ позволяет осуществить модернизацию ТЭП при эффективном использовании существующего ДПТ.

### Цель и постановка задачи

Целью работы является реализация режима ослабления поля ДПТ смешанного возбуждения с использованием только независимой обмотки возбуждения.

При этом следует решить следующие задачи:

- исследовать возможности получения требуемых характеристик при регулировании тока НОВ без шунтирования ПОВ;
- разработать схему силовых цепей и систему регулирования ТЭП;
- разработать математическую модель и осуществить «виртуальный» эксперимент.

### Расчет характеристик ослабления поля

Степень ОП принято оценивать коэффициентом регулирования возбуждения  $\alpha = F_{\text{ОП}}/F_{\text{ПП}}$  ( $F_{\text{ОП}}, F_{\text{ПП}}$  – МДС обмоток ДПТ при ослабленном и полном поле).

Рассмотрим возможности реализации режима ослабления поля применительно к ДПТ смешанного возбуждения типа ДК-210А-3 (ДК213А) с преобладанием МДС обмотки последовательного возбуждения, который находит широкое применение для троллейбусов и является типичным представителем этого класса ДПТ.

У ДПТ смешанного возбуждения общее значение МДС определяется суммой МДС последовательной и независимой обмоток, количество витков которых на полюс  $w_{\text{ПОВ}}$  и  $w_{\text{НОВ}}$

$$F_m = I_{\text{НОВ}}w_{\text{НОВ}} \pm I_{\text{Я}}w_{\text{ПОВ}} = w_{\text{ПОВ}}(I_{\text{Я}} \pm I_{\text{НОВ}}w_{\text{НОВ}}/w_{\text{ПОВ}}) = w_{\text{ПОВ}}(I_{\text{Я}} \pm I_0), \quad (1)$$

где для двигателя ДК-210А-3  $I_0 = I_{\text{НОВ}}/w_{\text{ПОВ}} = I_{\text{НОВ}}930/24 = 38,75I_{\text{НОВ}}$ ;  $I_{\text{НОВ}}, I_{\text{Я}}$  – токи НОВ и якоря.

В соответствии с (1) ослабление поля возможно за счет регулирования значений токов обмоток, а также изменением направления тока НОВ. Следует отметить, что в силу нелинейности кривой намагничивания степень

ослабления потока полюсов  $\Phi$  ДПТ не равна степени ослабления МДС. Поскольку тяговые ДПТ не имеют компенсационной обмотки, степень ОП ограничена действием «реакции» якоря и обычно не более 31 %.

В качестве исходных используем тяговую  $F(I_{я})$  и скоростную  $v(I_{я})$  характеристики ДПТ, приведенные к ободу колеса троллейбуса, для режимов полного и ослабленного до 31 % поля (МДС ПОВ) при снижении тока  $I_{нов}$  с 2 А до 0,715 А [1, 2].

Полагаем, что реверс ДПТ осуществляется по цепи возбуждения. Для изменения направления тока в ПОВ используются существующие в схеме ТС контакторы, преобразователь цепи НОВ реверсивный. При переходе в режим генераторного торможения ПОВ целесообразно закоротить, используя те же контакторы, чтобы исключить ее размагничивающее действие.

Есть две возможности определения значения магнитного потока (значения КФ, где К – конструктивный коэффициент): согласно характеристике для тягового усилия  $F \cdot D_k / 2 \cdot \eta \cdot i = K\Phi \cdot I_{я}$  ( $D_k$  – диаметр колеса) или скорости  $v(I_{я})$ . Угловая скорость ДПТ

$$\omega_{дв} = \frac{U_{ном} - I_{я} R_{яц}}{K\Phi}, \quad (2)$$

где  $R_{яц}$  – сопротивление якорной цепи, включая добавочные полюса  $R_{яц} = R_{я} + R_{дп} + R_{пов}$ ;  $U_{ном}$  – номинальное напряжение якоря ДПТ.

Зависимость  $F(I_{я})$  задана только в пределах 60÷300 А, что недостаточно. Поэтому использована зависимость  $v(I_{я})$  (естественная характеристика ДПС при номинальном напряжении  $U_{ном}=550$  В и токе  $I_{нов}=2$  А), которая задана для всего диапазона изменения тока ДПТ (0-400 А). Результаты расчета кривой намагничивания приведены в табл. 1.

В соответствии с табл. 1 можно рассчитать предельную характеристику ДПТ при ослаблении поля ( $I_{пов}/I_{я}=0,31$ ,  $I_{нов}=0,715$  А). При этом МДС  $F_m=24(0,31I_{я} - 38,75 \cdot 0,715)$ . Результаты расчета приведены в табл. 2. Соответствующая зависимость  $v(M)$  приведена на рис. 1 (кривая 2).

Рассмотрим возможности ОП только за счет регулирования значения тока НОВ, а при

необходимости – и изменения направления тока (переход ко встречно-смешанному возбуждению). При этом исходим из значения максимальной скорости  $\omega_{дв}$  при заданном значении момента сопротивления  $M_c$ . Момент сопротивления, приведенный к валу ДПТ

$$M_c = \frac{W \cdot D_k}{2 \cdot \eta \cdot i}, \quad (3)$$

где  $W=w_c G$  – сила сопротивления;  $G$  – вес ТС в кН;  $w_c = 12 + 0,004v^2$  [7];  $D_k$  – диаметр колеса;  $\eta$  – КПД передачи;  $i$  – передаточное число передачи.

Таблица 1 Расчет кривой намагничивания

| $I_{я}$ , А | $v$ , км/ч | $\omega_{дв} = 5,87v$ , 1/с | КФ, Вб | $F_m$ , А | $\frac{F_m}{F_{mmax}}$ | $M$ , Нм |
|-------------|------------|-----------------------------|--------|-----------|------------------------|----------|
| 0           | 41         | 240,7                       | 2,28   | 1860      | 0,162                  | 0        |
| 60          | 31         | 181,9                       | 2,95   | 3300      | 0,288                  | 177      |
| 100         | 26         | 152,6                       | 3,47   | 4260      | 0,372                  | 347      |
| 140         | 23         | 135                         | 3,87   | 5220      | 0,456                  | 542      |
| 180         | 21         | 123,3                       | 4,17   | 6180      | 0,54                   | 751      |
| 220         | 20         | 117,3                       | 4,31   | 7140      | 0,623                  | 948      |
| 300         | 18         | 105,7                       | 4,63   | 9060      | 0,79                   | 1389     |
| 400         | 16         | 93,9                        | 5      | 11460     | 1                      | 2000     |
| -77,5       | -          | -                           | 0      | 0         | 0                      | 0        |

Значение  $M_c = K\Phi \cdot I_{я}$ , откуда  $K\Phi = M_c / I_{я}$ . Тогда выражение (2) преобразуется к виду

$$\omega_{дв} = \frac{(U_{ном} - I_{я} R_{яц}) I_{я}}{M_c}, \text{ или} \\ I_{я}^2 \frac{R_{яц}}{M_c} - \frac{U_{ном} I_{я}}{M_c} + \omega_{дв} = 0. \quad (4)$$

Таким образом, соответствующее значение тока якоря можно найти как решение квадратного уравнения (4); значение КФ при этом значении тока

$$K\Phi = \frac{U_{ном} - I_{я} R_{яц}}{\omega_{дв}}.$$

Рассмотрим предельный случай, когда значение тока  $I_{нов} = -2$  А, тогда значение МДС  $F_m = 24(I_{я} - 77,5)$ . Значение КФ определяются согласно кривой намагничивания. Результаты расчета приведены в табл. 3. Соответствующая расчетная зависимость  $v(M)$  приведена на рис. 1 (кривая 3). На рис. 1 также

приведена зависимость  $v(M_c)$  для троллейбуса, полный вес которого  $G=160$  кН.

Таблица 2 Расчет характеристики ДПТ при ОП за счет ПОВ и НОВ

|                        |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $I_{я},$<br>А          | 0     | 77,5  | 100   | 137,2 | 150   | 177,5 | 250   | 300   |
| $F_M,$<br>Н            | 664,9 | 1241  | 1409  | 1686  | 1781  | 1985  | 2525  | 2897  |
| $\frac{F_M}{F_{Mmax}}$ | 0,058 | 0,108 | 0,123 | 0,147 | 0,155 | 0,173 | 0,22  | 0,253 |
| КФ                     | 0,8   | 1,38  | 1,7   | 2     | 2,1   | 2,3   | 2,6   | 2,8   |
| $M,$<br>Нм             | 0     | 106,9 | 170   | 274,4 | 315   | 408,2 | 650   | 840   |
| $\omega_{дв},$ 1/с     | 687,5 | 387,3 | 311,8 | 261,3 | 247,6 | 223,7 | 192,3 | 175   |
| $v,$<br>км/ч           | 117   | 65,8  | 53    | 44,4  | 42,1  | 38    | 32,7  | 29,7  |

Таблица 3 Расчет характеристики ДПТ при ОП за счет НОВ

|                        |       |          |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $I_{я},$<br>А          | 0     | 77,5     | 100   | 137,2 | 150   | 177,5 | 250   | 300   |
| $F_M,$<br>Н            | -1860 | 0        | 540   | 1432  | 1740  | 2400  | 4140  | 5340  |
| $\frac{F_M}{F_{Mmax}}$ | 0,162 | 0        | 0,047 | 0,125 | 0,152 | 0,21  | 0,36  | 0,466 |
| КФ                     | -2,28 | 0        | 0,6   | 1,626 | 2,08  | 2,53  | 3,45  | 3,87  |
| $M,$<br>Нм             | 0     | 0        | 60    | 223,1 | 312   | 449,1 | 862,5 | 1161  |
| $\omega_{дв},$ 1/с     |       | $\infty$ | 883,3 | 321,4 | 250   | 203,4 | 144,9 | 126,6 |
| $v,$<br>км/ч           |       | $\infty$ | 150,5 | 54,7  | 42,5  | 34,6  | 24,7  | 21,6  |

В соответствии с табл. 2 и 3 характеристики  $v(M)$  при обоих способах ОП пересекаются (равнозначны) при скорости ТС  $v$  примерно 42 км/ч. Возможности повышения скорости за счет НОВ (рис.1) несколько больше, но при скоростях ниже 42 км/ч немного снижа-

ется динамический момент ДПТ – ухудшается динамика разгона ТС.

Повысить момент двигателя на высоких скоростях в динамических режимах можно увеличением тока НОВ (кривая 4 на рис. 1 соответствует  $I_{нов} = -3$  А). Кратковременная перегрузка НОВ по току допустима [6] и используется в существующей схеме троллейбуса при торможении ДПТ.

Важным моментом для ТЭП является то, что динамический момент, необходимый для разгона ТС, характеризующегося значительной инерционностью, значительно превышает статический момент сопротивления. Для троллейбуса с полной массой 16000 кг для разгона до скорости 36 км/ч (10 м/с) за 20 с (ускорение  $0,5$  м/с<sup>2</sup>) требуется значение динамического момента на валу ДПТ  $M_{дин} = 435$  Нм, что в 1,96 раза превышает максимальное значение момента сопротивления  $M_c$  при скорости 60 км/ч. Допустимое ускорение составляет  $1,5$  м/с<sup>2</sup>. В соответствии с рис. 1 высокие динамические показатели обеспечиваются только в зоне скоростей до 20 км/ч.

Таким образом, САР ТЭП должна обеспечивать ограничение ускорения при разгоне (только в зоне пониженных скоростей); каких-либо требований по точности регулирования скорости ТС не предполагается. Кроме того, предполагается рекуперативное торможение при замедлении ТС, рабочее (экстренное) торможение осуществляется механическим тормозом.

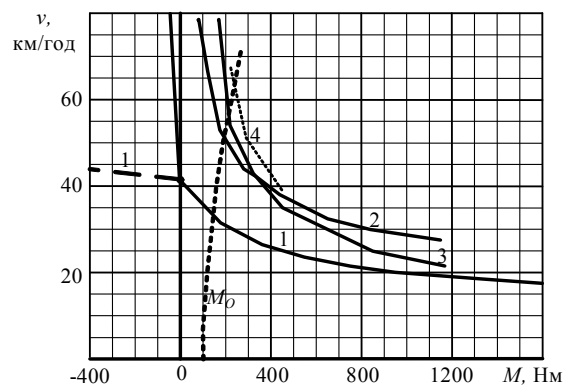


Рис. 1. Механические характеристики ДПТ: 1 – естественная (при полном поле); 2 – при ослаблении поля ПОВ; 3 – при ослаблении поля НОВ ( $I_{нов} = -2$  А); 4 – при ослаблении поля НОВ ( $I_{нов} = -3$  А)

Структурная схема ТЭП при регулировании тока НОВ приведена на рис. 2.

Импульсный преобразователь напряжения (ИПН) цепи якоря выполнен на транзисторах  $VT1, VT2$ , ИПН цепи НОВ реверсивный и выполнен по мостовой схеме ( $VT3 \div VT6$ ). На входе ИПН установлены конденсаторы  $C1, C2$ , исключающие разрыв входного тока при запираии транзисторов. Реверс цепи ПОВ осуществляется контакторами  $KH$  и  $KB$ . Си-

стема регулирования ТЭП реализует двухзонное управление ДПТ:

- при постоянном (номинальном) токе НОВ и регулировании напряжения якоря;
- при постоянном (номинальном) напряжении якоря и регулировании тока НОВ.

При использовании импульсных преобразователей в цепи якоря и НОВ целесообразно использовать их в режиме источников тока.

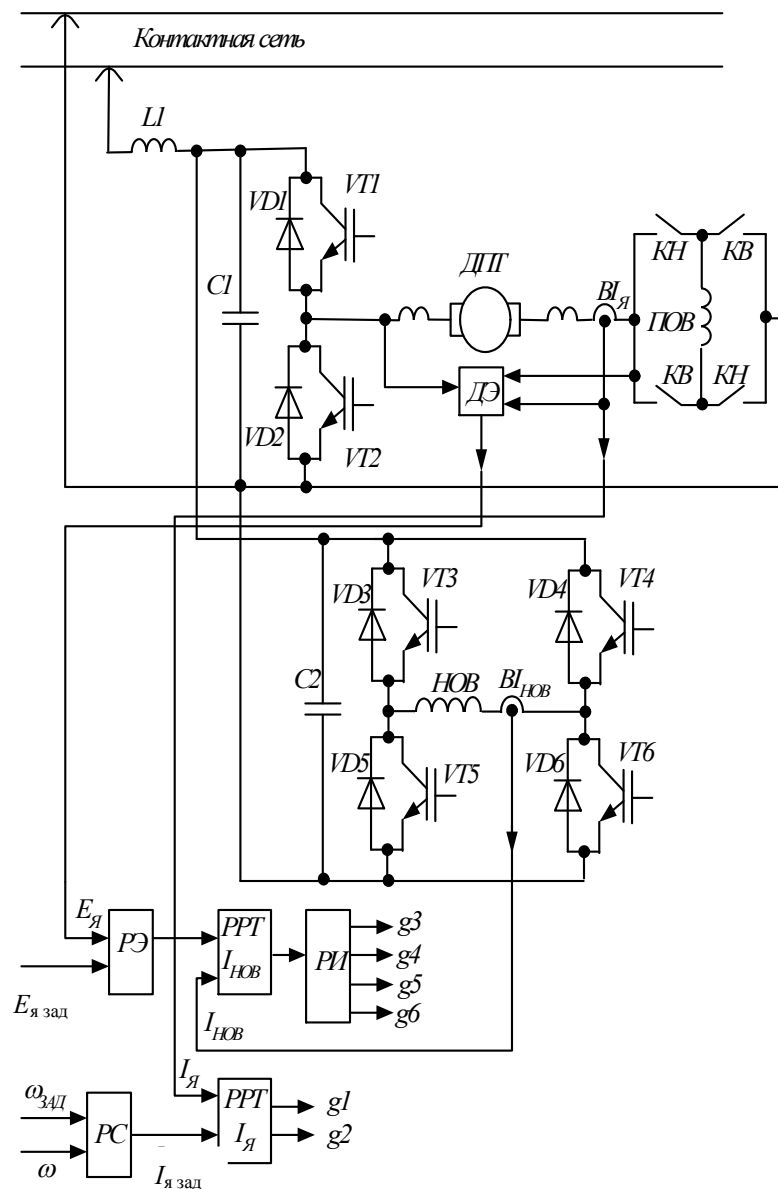


Рис. 2. Структурная схема тягового электропривода

Это достигается применением релейных (гистерезисных) регуляторов тока (PPT) без использования соответствующих контуров регулирования тока якоря и тока НОВ. На входы PPT подаются сигналы заданного и фактического значений тока. При этом за-

данное значение тока обрабатывается с допустимым отклонением  $\pm\delta$  (несколько % от номинального значения тока). Значение  $\delta$  определяет частоту переключения (модуляции) ключей ИПН [8]

$$f_M = \frac{\gamma(1-\gamma)U}{2 \cdot \delta \cdot L_n},$$

где  $L_n$  – индуктивность выходной цепи ИПН ( $L_n = L_{я} + L_{пов}$  – для цепи якоря и  $L_n = L_{нов}$  – для НОВ);  $\gamma$  – коэффициент заполнения импульсов напряжения.

При одинаковом отклонении значения тока в большую и меньшую сторону  $\pm\delta$  относительно среднего значения тока значение  $\gamma = 0,5$ . Тогда

$$f_M = \frac{0,25U}{2 \cdot \delta \cdot L_n}.$$

Следует отметить, что при использовании ИПН как источника напряжения с ШИМ амплитуда пульсаций тока якоря изменяется в широких пределах в зависимости от  $\gamma$ .

В ИПН цепи НОВ используется однополярная модуляция, алгоритм распределения импульсов по сигналу РРТ реализует распределитель импульсов РИ. Следует отметить, что использование ИПН позволяет существенно уменьшить потери в цепи НОВ. Так, в стандартной схеме включения ДПТ с релейно-контакторной схемой для ограничения тока НОВ (2 А) используется реостатная схема, потери энергии в которой составляют более 700 Вт.

Система регулирования тока НОВ замкнута по ЭДС якоря ДПТ и включает в себя регулятор ЭДС (РЭ) и датчик ЭДС (ДЭ). Выходной сигнал РЭ является заданием тока НОВ, который обрабатывается РРТ. РЭ выполнен с несимметричным ограничением, определяющим предельное значение тока НОВ (2 А – в режиме полного поля и -3 А – в режиме ослабления поля). Превышение током НОВ номинального значения 2 А допускается только в динамических режимах [6]. Для ограничения тока в статических режимах вводится ограничение скорости ТС. ДЭ реализует функцию  $E_{я} = U_{я} - I_{я}(R_{я} + R_{дп})$ , где  $U_{я}$ ,  $I_{я}$  – измеренные значения напряжения на зажимах якоря и тока якоря. Заданное значение ЭДС  $E_{я\text{зад}} = U - I_{я\text{ном}}(R_{я} + R_{дп})$ , где  $U$  – измеренное значение напряжения в контактной сети. Значение  $E_{я} = K\Phi\omega_{дв}$ , поэтому вначале разгона  $E_{я} < E_{я\text{зад}}$  и РЭ находится в насыщении – задается ток  $I_{нов} = 2$  А. По мере разгона  $E_{я}$  увеличивается, что приводит к уменьшению

задания тока НОВ с последующим изменением направления ( $E_{я} \geq E_{я\text{зад}}$ ), чтобы поддерживать значение  $E_{я\text{зад}}$  близким к заданному.

Система регулирования тока якоря – замкнутая по скорости. Регулятор скорости (РС) выполнен с заданием тока  $I_{я\text{зад}}$  «под отсечку» (320 А) из условия ограничения ускорения при разгоне в первой зоне (регулирования напряжения цепи якоря). По мере разгона напряжение на зажимах якоря нарастает до напряжения сети – ключ VT1 в последующем открыт. Поддержание заданного значения тока якоря невозможно, и темп разгона снижается. При этом работает только контур регулирования ЭДС. По мере приближения скорости к заданному значению задание тока якоря снижается до значения, соответствующего значению момента сопротивления. РЭ при этом задает соответствующее значение тока  $I_{нов} \leq 2$  А.

В простейшем случае может быть использована разомкнутая по скорости система регулирования. При этом водителем педалью «газ» задается значение  $I_{я\text{зад}}$  (с ограничением), формируя необходимый темп разгона.

Для замедления (подтормаживания) задание на скорость сбрасывается (педаль «газ») – водитель нажимает на педаль «тормоз», которая в первом секторе нажатия задает ток якоря (со знаком «–») – тормозной момент, а при дальнейшем нажатии воздействует на механический тормоз. При этом ток якоря снижается до нуля, после чего шунтируется ПОВ (без тока), задается ток  $I_{нов} = 2$  А. В дальнейшем осуществляется рекуперативное торможение ДПТ с заданным моментом. ДПТ используется как генератор независимого возбуждения. При невозможности рекуперации всей энергии торможения в сеть (часть используется для питания собственных нужд ТС) для защиты цепей ТЭП от перенапряжения во входной цепи используется тормозной резистор с ключом (на рис. 2 не показаны). Ключ переключается при превышении напряжением сети заданного (предельного) значения, сбрасывая избыточную энергию. При этом напряжение поддерживается на заданном уровне.

### Результаты моделирования

Для исследования предложенных решений использовалось моделирование в программном пакете Matlab (приложение SimPow-

erSystems). При этом разработана математическая модель всей системы ТЭП, включая источник питания, систему регулирования, ИПН, ДПТ и нагрузку ТС. Модель ДПТ с нагрузкой ТС выполнена с учетом кривой намагничивания (задана функциональной зависимостью) и описывается следующими уравнениями

$$u_{я} = e_{я} + i_{я}(R_{я} + R_{дп} + R_{пов}) + (L_{я} + L_{пов}) \frac{di_{я}}{dt},$$

$$u_{нов} = i_{нов} R_{нов} + L_{нов} \frac{di_{нов}}{dt},$$

$$e_{я} = K\Phi \cdot \omega_{дв},$$

$$M = K\Phi \cdot i_{я},$$

$$K\Phi = f\left(w_{пов} \left(i_{я} + i_{нов} \frac{W_{нов}}{W_{пов}}\right)\right),$$

$$M - M_c = J_{пр} \frac{d\omega_{дв}}{dt},$$

$$M_c = \frac{W \cdot D_k}{2 \cdot \eta \cdot i},$$

$$W = (12 + 0,004v^2)G,$$

$$J_{пр} = m \cdot K_{и} \frac{D_k^2}{4i^2},$$

$$\omega_{дв} = \frac{v \cdot i}{1,8 \cdot D_k} = cv,$$

где  $u_{я}$ ,  $u_{нов}$ ,  $i_{я}$ ,  $i_{нов}$  – мгновенные значения напряжений и токов якоря и НОВ;  $L_{я}$  – индуктивность обмотки якоря и добавочных полюсов;  $L_{нов}$ ,  $L_{пов}$  – индуктивности обмоток возбуждения;  $J_{пр}$  – приведенный к валу двигателя момент инерции ТС;  $v$  – линейная скорость ТС в км/ч;  $K_{и} = (1,15 \div 1,2)$  [7];  $m$  – масса ТС.

Для реализации моделей ИПН и системы регулирования использованы стандартные и модифицированные блоки из библиотеки Matlab Power Simulink.

На рис. 3 приведены осциллограммы разгона ТС с полной загрузкой ( $m = 16000$  кг) до скорости 45 км/ч с последующим замедлением (торможением). Длительность разгона составляет 18,6 с, что соответствует стандартным показателям современных троллейбусов.

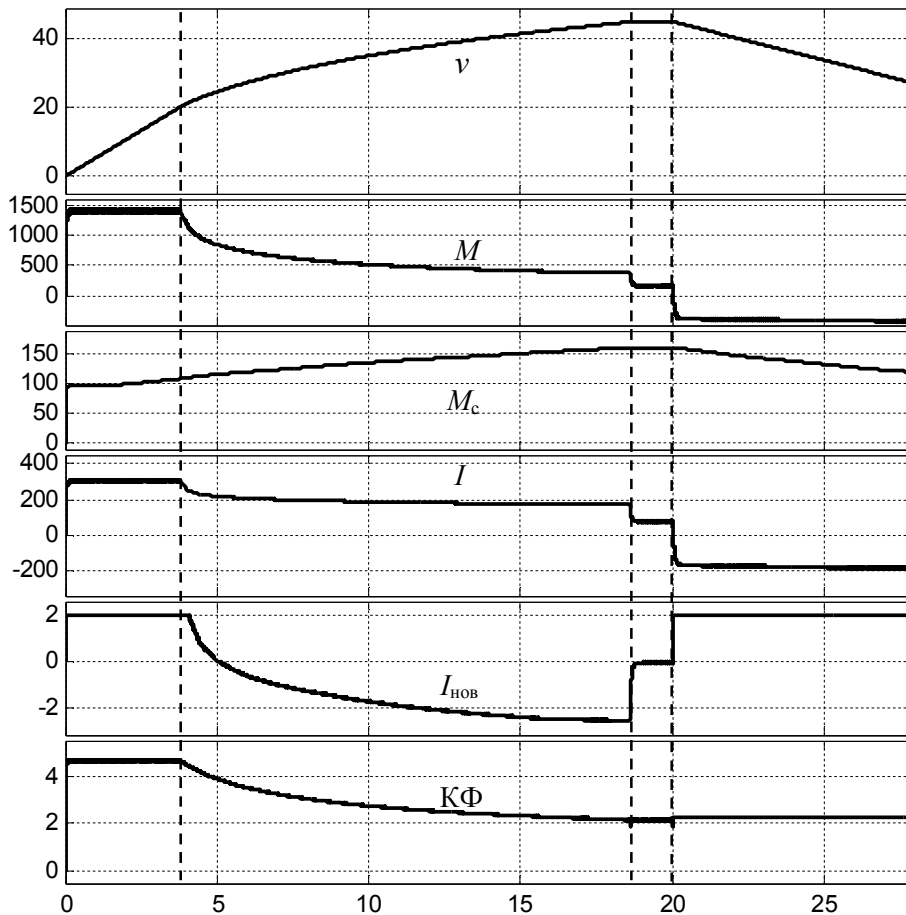


Рис. 3. Осциллограмма разгона ТЭП с последующим замедлением

Как видно из рис. 3, закон изменения скорости  $v(t)$  в процессе разгона ТЭП – нелинейный – начальный участок до  $v=20$  км/ч – линейный (при постоянном ускорении 1,5 м/с). В дальнейшем ускорение снижается. Во второй зоне регулирования (ОП) при постоянном напряжении на зажимах якоря ток НОВ уменьшается и изменяет свое направление, его значение достигает  $-2,55$  А. При приближении к установившемуся значению скорости ток якоря снижается, снижается и значение тока НОВ до  $-0,1$  А. При замедлении машина работает как ДПТ независимого возбуждения. Увеличение тока НОВ свыше 2 А имеет место только в динамике.

### Выводы

Применительно к ТЭП с ДПТ смешанного возбуждения обоснована возможность реализации режима ослабления поля в стандартной схеме включения ПОВ и НОВ путем регулирования тока цепи НОВ. Для чего используется маломощный реверсивный импульсный преобразователь напряжения. Разработана схема силовых цепей и структура системы автоматического регулирования с использованием в качестве внутренних гистерезисных регуляторов тока якоря и независимой обмотки возбуждения. В качестве внешних регуляторов используются регуляторы ЭДС якоря и регулятор скорости. Это позволит осуществить модернизацию существующих ТС с минимальными затратами в условиях депо путем установки соответствующего блока по аналогии с тяговыми контейнерами типа Segelic, используемыми в современных ТС. Дальнейшее направление работ – совершенствование принципов управления полем ДПТ для обеспечения максимальных динамических показателей при минимальных потерях энергии.

### Литература

1. Вишник Г.В. Троллейбус пассажирский ЗиУ-682Б / Г.В. Вишник, В.И. Шабалин, И.Г. Осипов и др. – М.: Транспорт, 1977. – 208 с.
2. Корягина Е.Е. Электрооборудование трамваев и троллейбусов / Е.Е. Корягина, О.А. Коськин. – М.: Транспорт, 1982. – 296 с.
3. Андрійченко В.П. Вдосконалення способу регулювання збудження тягових двигунів постійного струму / В.П. Андрійченко, С.О. Закурдай, І.О. Костенко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Вип. 67. – С. 31–35.
4. Кривовяз В. Тяговый электропривод постоянного тока модернизированного трамвайного вагона «Татра-3Е» / В. Кривовяз, П. Васильев, В. Маевский // Силовая электроника. – 2007. – №3. – С. 36–38.
5. Троллейбус Е301D1. Настанова щодо експлуатування. – ЗАТ «Завод комунального транспорту». – Львів, 2007. – 427 с.
6. Двигатель типа ДК210-А3. Паспорт. ИРАК.652.000.089ТБ, 1986.
7. Основи електричної тяги: навч. посібник / В.Х. Далека, П.М. Пушков, В.П. Андрійченко, Ю.В. Мінесва. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 312 с.
8. Шавьолкін О.О. Перетворювальна техніка: навч. посіб. / О.О. Шавьолкін, О.М. Наливайко. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – 328 с.

Рецензент: Ю.В. Батыгин, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 20 июля 2015 г.