

А. А. ШАВЁЛКИН, В. А. ГЕРАСИМЕНКО, С. М. КОЖЕМЯКИН

УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ТРАМВАЯ С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Проанализированы существующие технические решения по модернизации тягового электропривода трамвая с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения. Исследовано ослабление поля двигателя шунтированием обмотки возбуждения преобразователем на IGBT с возможностью утилизации энергии. Предложены схемы тяговых преобразователей с шунтированием и независимым включением последовательной обмотки возбуждения, позволяющие снизить потери энергии в силовых цепях, работоспособность их подтверждена математическим моделированием.

Ключевые слова: IGBT, тяговый электропривод, двигатель постоянного тока, ослабление поля, импульсный преобразователь постоянного напряжения, городской электротранспорт.

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 (ГЭТ) преобладающее применение находит тяговый электропривод с двигателями постоянного тока (ДПТ) большей частью с реостатным управлением при значительных энергозатратах. Для трамваев и ряда моделей троллейбусов базовым является решение с ДПТ последовательного 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. В первую очередь, это касается трамваев типа «Татра 3Е» с реостатно-контакторным ТЭП. Замена реостатной схемы на транзисторный агрегат, имеющий минимальную стоимость и потери энергии, при модернизации ТЭП в условиях депо позволит существенно снизить энергопотребление и повысить эффективность эксплуатации существующих трамваев.

Анализ основных достижений и литературы. Следует отметить, что в настоящее время рядом предприятий как компромиссный вариант выпускаются новые модели троллейбусов и трамваев, где используется ТЭП с ДПТ с импульсными преобразователями напряжения (ИП) на IGBT. Базовая схема (рис. 1), используемая в современных моделях ТС (фирмы Cegelec, Ganz Ansaldo и др.) содержит реверсивный мостовой ИП на четырех IGBT с обратными диодами для цепи последовательной обмотки возбуждения (ПОВ) и ИП для цепи якоря на двух IGBT. На рис. 1 не показаны входные цепи и блок тормозного резистора, используемый при невозможности рекуперации энергии торможения в питающую сеть, которые применяются во всех вариантах схемы ТЭП. В ТЭП трамвая четыре ДПТ – по два на переднюю и заднюю тележку. Поэтому используются

два тяговых агрегата, при этом для пар ДПТ обмотки возбуждения и обмотки якоря соединены последовательно. Данная схема обеспечивает независимое регулирование потока и тока якоря, реализует рекуперацию энергии торможения и бесконтактный реверс. Вместе с тем, схема содержит $6 \cdot 2 = 12$ мощных IGBT и характеризуется достаточно большими потерями энергии в транзисторах. При этом ДПТ используется как машина независимого возбуждения, все ключи на один ток. Самой затратной является цепь возбуждения, как по количеству ключей, так и по потерям энергии – одновременно ток проводит пара ключей.

При модернизации ТЭП следует учитывать возможность использования существующего оборудования (например, контакторов), уменьшения количества дорогостоящих транзисторных ключей, что способствует снижению стоимости, модернизации и потере энергии в силовых цепях.

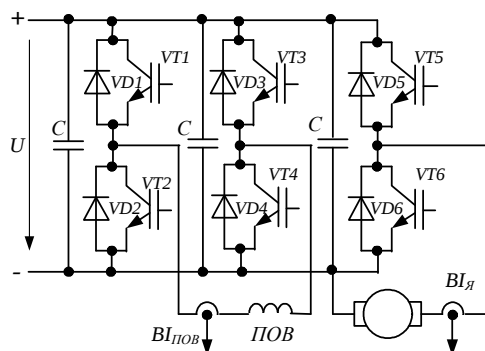


Рис. 1 – Схема силовых цепей тягового агрегата с независимым регулированием тока цепи якоря и обмотки возбуждения

В ряде работ [1, 2] предлагается классический подход с использованием шунтирования ПОВ в режиме ослабления поля. На современном уровне для шунтирования используется ключевая схема на IGBT.

Для реверса можно использовать контакторы, тем более что реверс осуществляется без тока. В этом варианте меньше ключей и снижаются потери энергии.

Решение, где благодаря использованию

существующих контакторов (КВ и КН) количество ключей на IGBT уменьшено до четырех (рис. 2) предложено в работе [1]. При этом сохраняется последовательное соединение ПОВ и якоря.

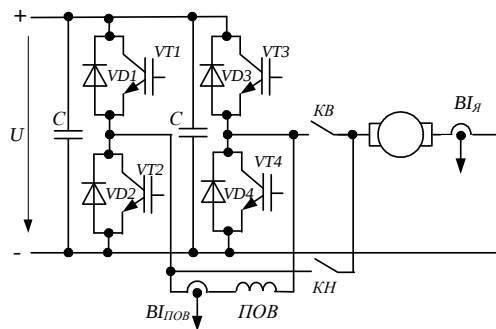


Рис. 2 – Схема силовых цепей тягового агрегата с последовательным соединением цепи якоря и обмотки возбуждения

Для ослабления поля ДПТ используется шунтирование ПОВ одним из ключей схемы. Вместе с тем вопрос о потерях энергии при данном способе шунтирования исследован недостаточно.

Для утилизации энергии, отбираемой при шунтировании ПОВ, для собственных нужд ТС в работе [2] предложено использовать преобразователь постоянного тока (DC-DC), выполненный на базе шунтирующего ключа.

Таким образом, вопрос совершенствования схемных решений ТЭП при модернизации существующих ТС исследован недостаточно полно и имеются определенные возможности для дальнейшего снижения энергопотребления и стоимости тягового агрегата.

Цель работы, постановка задач исследования. Разработка схемных решений и принципов управления ТЭП постоянного тока с ДПТ последовательного возбуждения, обеспечивающих минимальные энергопотребление и затраты на модернизацию существующих ТС.

При этом необходимо решить следующие задачи:

- исследовать возможности уменьшения количества силовых IGBT ключей в схеме ИП;
- разработать соответствующую систему управления ТЭП;
- разработать математическую модель ТЭП и осуществить «виртуальный» эксперимент.

Материалы исследований. Независимое управление током ПОВ (рис. 1). Оценим потери в ключах схемы в процессе разгона ТЭП трамвая Татра Т-3 при использовании ДПТ типа ТЕ-022 (45 кВт) с номинальным током 150 А. Полагаем, что пуск осуществляется с током $I_{\text{ЯП}}=I_{\text{ПОВ}}=250$ А. Сопротивление ПОВ (при последовательном соединении двух ДПТ) $R_{\text{ПОВ}}=0.052$ Ом. При напряжении в контактной сети $U_{\text{C}}=600$ В можно использовать IGBT типа SKM300 GB126D класса 1200 В на ток $I_{\text{C}}=310$ А с параметрами транзистора: пороговое напряжение $U_{\text{CE(ТО)}}=1$ В, дифференциальное сопротивление $R_{\text{CE}}=3.5$ Ом, энергия переключения $E_{\text{ON}}(E_{\text{Off}})=21(33)$ мДж, $E_{\text{tot}}=E_{\text{ON}}+E_{\text{Off}}=54$ мДж (при

$U_{\text{CC}}=600$ В, $I_{\text{C}}=200$ А). Обратный диод имеет близкие параметры $U_{\text{(ТО)}}=1$ В, $R_{\text{r}}=3$ Ом, $E_{\text{т}}=18$ мДж. Принимаем частоту ШИМ $f_{\text{SW}}=1000$ Гц.

Потери мощности в транзисторе включают в себя потери проводимости P_{C} и переключения P_{SW} :

$$P_{\text{C}} = U_{\text{CE(ТО)}} I_{\text{VTCP}} + I_{\text{VT}}^2 R_{\text{CE}},$$

$$P_{\text{SW}} = f_{\text{SW}} E_{\text{tot}} \left(\frac{I_{\text{CP}}}{I_{\text{CT}}} \right)^{K_{\text{I}}} \left(\frac{U}{U_{\text{CT}}} \right)^{K_{\text{V}}},$$

где I_{VTCP} , I_{VT} – соответственно среднее и действующее значение тока транзистора;

K_{I} , K_{V} – коэффициенты аппроксимации, определяющие зависимость потерь энергии (E_{SW}) при фактических значениях тока и напряжения (для IGBT класса 1.2 кВ значения $K_{\text{V}}=1.4$, $K_{\text{I}}=1$).

Потери в ИП якорной цепи. Ток транзистора в схеме ИП имеет характер импульсов с коэффициентом заполнения $\gamma=0 \div 1$, его среднее значение $I_{\text{VTCP}}=\gamma I_{\text{Я}}$. Полагаем, что импульсы тока имеют форму близкую к прямоугольной, тогда можно считать, что $I_{\text{VTCP}}=I_{\text{VT}}$. Для значения $\gamma=0.9$ $I_{\text{VTCP}}=0.9 \cdot 250=225$ А, $P_{\text{C}}=402.2$ Вт, $P_{\text{SW}}=60.75$ Вт. Общие потери мощности в транзисторе составляют $P=462.95$ Вт. Для диода $I_{\text{VDCP}}=(1-\gamma)I_{\text{Я}}$ мощность потерь $P=29$ Вт. Общие потери в схеме составляют 492 Вт, это значение в процессе пуска и изменении γ практически неизменное – имеет место перераспределение потерь в транзисторе и диоде.

Потери в ключах ИП цепи ПОВ. Рассмотрим использование однополярной ШИМ [3]. Напряжение ПОВ $U_{\text{ПОВ}}=R_{\text{ПОВ}}I_{\text{ПОВ}}=(0.026 \cdot 2)250=13$ В. При этом $U_{\text{ПОВ}}=U_{\text{CP}}=(2\gamma-1)U_{\text{C}}$, откуда значение $\gamma=0.51$. В мостовой схеме в процессе формирования выходного напряжения используются два транзистора и два диода, для них $I_{\text{VTCP}}=\gamma I_{\text{ПОВ}}=127.5$ А, $I_{\text{VDCP}}=(1-\gamma)I_{\text{ПОВ}}=122.5$ А. Общие потери мощности в транзисторе составляют $P=218.8$ Вт, общие потери в схеме ИП 870 Вт.

Используя взамен IGBT, имеющиеся в модернизируемом ТС, контакторы, получаем схему, приведенную на рис. 3.

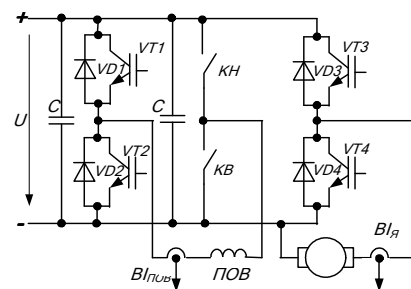


Рис. 3 – Схема силовых цепей тягового агрегата с независимым регулированием тока цепи якоря и обмотки возбуждения с реверсом на контакторах

При сохранении возможностей схемы на рис. 1 потери энергии в цепи ПОВ уменьшаются вдвое (за вычетом потерь в контакторе).

Рассмотрим схему на рис. 2, в которой также используются 4 ключа на IGBT. В ней авторы ушли от независимого управления ПОВ и используют для

ослабления поля шунтирование ПОВ ключом. Так при направлении движения вперед (замкнут контакт контактора КВ и включен VT1), когда на ДПТ подано все напряжение сети, в качестве шунтирующего используется VT3. При этом возможно независимое регулирование тока ПОВ при условии, что $I_{ПОВ} \leq I_{Я}$.

При шунтировании ПОВ часть энергии отбираемой от ПОВ теряется. Оценим потери мощности в шунтирующей цепи. Постоянная составляющая напряжения ПОВ (падение напряжения на активном сопротивлении ПОВ) $U_{П} = I_{ПОВ} R_{ПОВ} = \alpha I_{Я} R_{ПОВ}$ ($\alpha = I_{ПОВ} / I_{Я}$ – коэффициент ослабления поля). Мощность шунтирующей цепи $P_{П} = U_{П} I_{ПОВ} = R_{ПОВ} I_{Я}^2 \alpha (1 - \alpha)$ ($I_{ПОВ} = I_{Я} (1 - \alpha)$ – ток шунтирующей цепи) имеет максимальное значение при $\alpha = 0.5$ (предельное ослабление поля). При разгоне с предельным током якоря $I_{Я} = 250$ А и $\alpha = 0.5$ мощность $P_{П} = 812.5$ Вт, при $\alpha = 0.9$ мощность $P_{П} = 292.5$ Вт. В тоже время потери мощности в IGBT типа SKM300 GB1126D при токе 100 А составляют порядка 160 Вт, остальная энергия должна рассеиваться в снабберных цепях, что не эффективно.

Уменьшить количество силовых IGBT ключей в схеме до трех позволяет схема, приведенная на рис. 4.

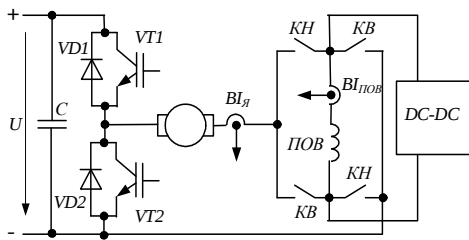


Рис. 4 – Схема силовых цепей тягового агрегата с последовательным соединением цепи якоря и ПОВ с реверсом на контакторах и шунтирующим преобразователем

Реверс ПОВ при этом осуществляется посредством контакторов, шунтирование транзистором VT3 (рис. 5) в составе преобразователя постоянного тока (DC-DC), используемого для утилизации энергии. DC-DC преобразователь двухзвенный (рис. 5), его входная цепь представляет собой повышающий импульсный преобразователь напряжения ПОВ.

В качестве буферной индуктивности используется индуктивность ПОВ, при отпирании транзистора VT3 ток через него нарастает (скорость нарастания ограничивается индуктивностью), при запираании VT3 запасенная энергия через диод VD4 передается в выходную цепь на преобразователь нагрузки DCH и используется, например, для подзарядки аккумуляторной батареи. Конденсатор C обеспечивает сглаживание напряжения на входе DCH.

При отсутствии утилизации вместо DCH используется резистор, в котором рассеивается энергия – получаем классическую схему снаббера. Данная схема шунтирования используется только при направлении движения вперед. При движении назад ослабление поля не требуется. Поскольку при реверсе направление тока ПОВ меняется, последовательно с

VT3 включен диод VD3, блокирующий обратное напряжение на транзисторе. Формирование тока ПОВ осуществляется с помощью релейного (гистерезисного) регулятора тока (PPT), который управляет переключением VT3, отработывая заданный ток $I_{ПОВ}$ с заданным отклонением δ (несколько %). Фактическое значение тока измеряется датчиком $BI_{ПОВ}$.

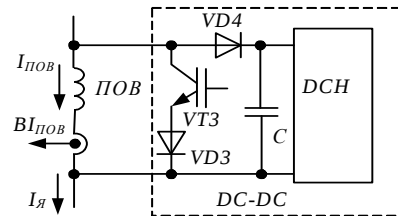


Рис. 5 – Схема шунтирующего преобразователя

Схема реализует рекуперативное торможение с самовозбуждением ДПТ. При этом включается контактор КН (назад), подключая ПОВ согласно с направлением $E_{Я}$ (остаточной ЭДС $E_{Яост}$), затем отпирается VT2 (рис. 4). Под действием $E_{Яост}$ в цепи якорь – ПОВ возникает ток, что обуславливает процесс самовозбуждения машины. Регулятор тока якоря также, как и тока ПОВ релейный и удерживает VT2 в открытом состоянии пока ток якоря не достигнет значения $(I_{ЯЗад} + \delta)$, при запираании VT2 отпирается диод VD1 – энергия передается в сеть, ток якоря снижается до значения $(I_{ЯЗад} - \delta)$, опять отпирается VT2 и т.д. Таким образом, ТЭП переходит в режим рекуперативного торможения с независимым регулированием тока ПОВ.

Следует отметить, что потери энергии в шунтирующей цепи ПОВ имеют место не только в режиме ослабления поля, но и при полном поле ДПТ, когда используется импульсное регулирование напряжения. В данном случае потери обусловлены двумя факторами: протеканием постоянной составляющей тока в цепи диод VD4–DCH (рис. 5), и импульсной составляющей напряжения на ПОВ в процессе регулирования напряжения якорной цепи ДПТ. При запертом состоянии VT3 шунтирующая цепь образует схему ИП и энергия от индуктивности ПОВ передается в DCH.

Наибольшие потери имеют место в начале пуска ДПТ, когда ЭДС якоря равна нулю и все напряжение сети приложено к обмоткам. В замкнутой системе регулирования при скачкообразном задании тока якоря (пуск «под отсечку») интервал времени, когда на ДПТ для обеспечения нарастания тока якоря подается полное напряжение сети с учетом электромагнитной постоянной цепи якоря достаточно большой. Для снижения потерь в шунтирующей цепи целесообразно ограничить скорость нарастания тока якоря.

Система автоматического регулирования (САР) ТЭП обеспечивает двухзонное регулирование скорости ДПТ. В первой зоне регулирование скорости достигается изменением напряжения якоря $U_{Я}$ при $I_{Я} = I_{ПОВ}$ (полное поле), во второй зоне – регулированием тока $I_{ПОВ} = \alpha I_{Я}$ при $U_{Я} = U_C$ (ослабление поля). Пуск ТЭП в первой зоне осуществляется при

постоянном токе якоря и ПОВ (при постоянном моменте ДПТ). Поскольку характеристика ДПТ «мягкая» переход во вторую зону осуществляется при различной скорости, определяемой значением тока якоря (момента). Традиционным решением для двухзонного регулирования является использование регулятора ЭДС (РЭ). При этом заданное значение ЭДС якоря $E_{я} = U_{с} - I_{я} \cdot R_{яц}$ ($R_{яц}$ – общее сопротивление цепи якоря) в первой зоне превышает фактическое значение $E_{я} = U_{я} - I_{я} \cdot R_{яц}$ и задание на ток ПОВ равно фактическому значению тока якоря. По достижении напряжением якоря значения напряжения сети осуществляется переход в режим ослабления поля. Значение ЭДС якоря становится близким к заданному значению и РЭ снижает задание на ток ПОВ по мере разгона ДПТ. При торможении функцией РЭ является ограничение ЭДС на заданном уровне.

В простейшем случае САР содержит релейные регуляторы тока якоря и тока ПОВ, а также функциональный преобразователь, который формирует задание на ток ПОВ в соответствии с заданным значением $I_{язад}$ и фактическим значением скорости ДПТ ω . Значение $I_{язад}$ задается водителем при нажатии на педаль «газ». При достижении заданного значения скорости водитель ТС сбрасывает «газ» – задание на ток якоря и ТЭП переходит в режим «выбега» с последующим разгоном при снижении скорости или торможением. В режиме торможения ток якоря задается педалью «тормоз» в первом секторе ее поворота (при дальнейшем ее нажатии срабатывают механические тормоза).

Результаты моделирования. Моделирование осуществлялось с использованием программного пакета Matlab. При этом рассмотрена возможность модернизации ТЭП трамвая типа Татра (масса вагона 30 т) с четырьмя двигателями ТЕ-022 (по два последовательно на переднюю и заднюю тележки) при использовании тягового агрегата по схемам на рис. 3 и рис. 4. Разработаны полные модели ТЭП с использованием стандартных блоков. Модель ДПТ составлена в соответствии с уравнениями:

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

$$i_{пов} = \alpha \cdot i_{я}, \quad e_{я} = K\Phi \cdot \omega_{дв}, \quad M = K\Phi \cdot i_{я},$$

$$M - M_{с} = J_{пр} \frac{d\omega_{дв}}{dt}, \quad M_{с} = \frac{W}{2} \frac{D_{к}}{\eta \cdot i},$$

$$W = (5 + 0,005v^2)G,$$

$$J_{пр} = m \cdot K_{и} \frac{D_{к}^2}{4i^2}, \quad \omega_{дв} = \frac{v \cdot i}{1,8 \cdot D_{к}} = cv,$$

где $u_{я}$, $i_{я}$, $i_{пов}$ – мгновенные значения напряжений и токов якоря и ПОВ;

$L_{я}$ – индуктивность обмотки якоря и добавочных полюсов;

$L_{пов}$ – индуктивность ПОВ;

$J_{пр}$ – приведенный к валу двигателя момент инерции трамвая;

v – линейная скорость ТС в км/час;

$K_{и} = (1,15 \div 1,2)$ [4];

m и G – масса (кг) и вес (кН) трамвая;

$D_{к}$ – диаметр колеса;

i – передаточное число передачи;

M и $M_{с}$ – момент двигателя и момент сопротивления, приведенный к валу ДПТ, для прямолинейного горизонтального участка движения, $\alpha = (1 \div 0,5)$ – коэффициент ослабления поля.

При независимом включении ПОВ

$$u_{я} = e_{я} + i_{я}(R_{я} + R_{дп}) + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} \quad \text{и}$$

$$u_{пов} = i_{пов}R_{пов} + L_{пов} \frac{di_{пов}}{dt}.$$

Ключевым в модели является описание магнитной характеристики тягового ДПТ, поскольку при расчете характеристик и моделировании ДПТ необходимо знать значение потока машины при произвольных значениях тока якоря и возбуждения ($I_{пов}$). Предложена методика расчета, основанная на использовании электромеханических характеристик двигателя ($n(I_{я})$) при полном и ослабленном поле, приведенных в [5]. Значения КФ определены в соответствии с выражением $K\Phi = \frac{U_{ном} - I_{я}R_{яц}}{\omega_{дв}}$.

Характеристики $K\Phi(I_{я})$ соответствуют значениям тока возбуждения $I_{пов} = I_{я}$ (полное поле) и $I_{пов} = 0,5I_{я}$ (ослабленное поле при $\alpha = 0,5$). Предложено определять значение $K\Phi$ как функцию от МДС $I_{пов}$ и $I_{я}$:

$K\Phi = cI_{пов} + vI_{я} + K\Phi_{ост} = c(\alpha I_{я}) + vI_{я} + K\Phi_{ост} = (c\alpha + v)I_{я} + K\Phi_{ост}$, где $c = f(I_{я})$ и $v = f(I_{я})$ – зависимости, рассчитанные в соответствии с $K\Phi(I_{я})$ при полном поле и $\alpha = 0,5$ (вводятся в модель в табличной форме),

$K\Phi_{ост}$ – остаточный магнитный поток.

На рис. 6, а, для варианта ТЭП с шунтированием ПОВ приведены осциллограммы разгона трамвая с полной загрузкой до скорости 41 км/час ($0-t_2$) с последующим выбегом (t_2-t_3) и замедлением (торможением). При этом осциллограммы приведены для пары ДПТ, соединенных последовательно. Значение тока якоря задавалось максимальным 250 А. При этом интервал ($0-t_1$) соответствует разгону с полным полем, когда ток якоря постоянный и равен заданному значению – момент ДПТ тоже постоянный. На интервале (t_1-t_2) к ДПТ подведено полное напряжение и осуществляется ослабление поля при снижении тока ПОВ. На интервале (t_2-t_3) ДПТ отключается от сети, последующее торможение начинается с самовозбуждения машины с последующим переходом импульсного преобразователя цепи якоря в режим повышения напряжения с передачей энергии от ЭДС якоря в сеть.

На рис. 6, а, также приведена зависимость для мощности РШ, передаваемой от ПОВ в ДСН. За счет ограничения скорости нарастания задания тока якоря потери в шунтирующей цепи при пуске сведены к минимуму, но при ослаблении поля возникает задача утилизации энергии либо рассеивания ее на реостате.

При использовании схемы рис. 3 с независимым формированием тока ПОВ возможности ТЭП те же, но при несколько меньших потерях энергии ($P_{к}$) в ключах ИП ПОВ – рис. 6, б.

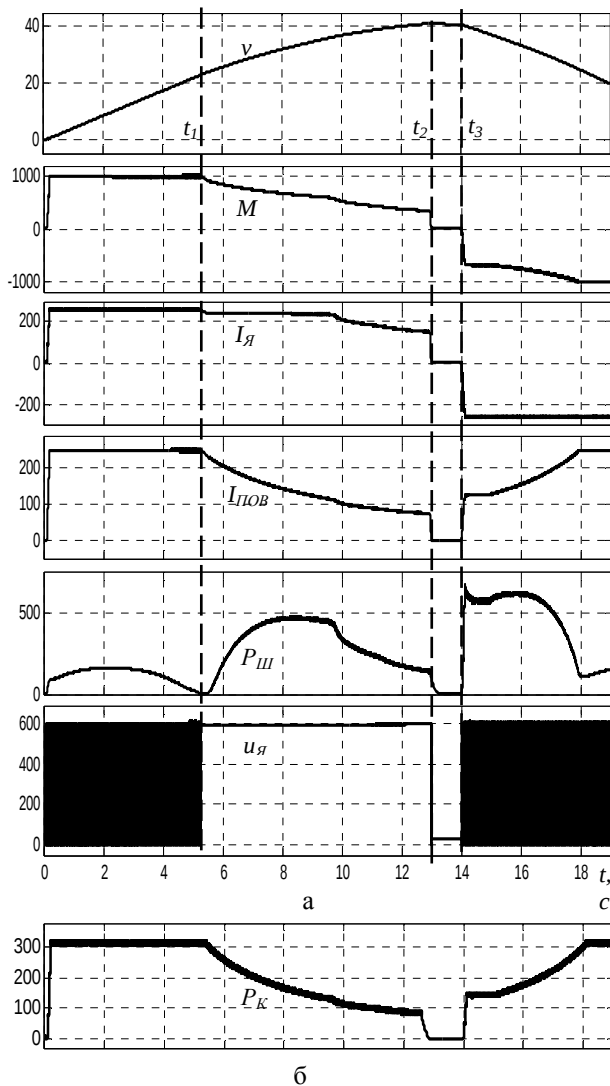


Рис. 6 – Осциллограмма пуска ТЭП с последующим торможением

Выводы. При одинаковых показателях регулирования наименьшие потери энергии в силовых цепях имеет схема на рис. 3, при условии утилизации энергии

шунтирования эффективно применение схемы на рис. 4. Минимальное количество дорогостоящих силовых транзисторов позволяет осуществить модернизацию трамвая при минимальных затратах непосредственно в депо. Дальнейшее направление исследований – оценка целесообразности утилизации энергии шунтирования.

Разработана структурная схема системы управления шунтирующим ключом, обеспечивающая формирование заданного значения тока ПОВ с использованием релейного регулятора тока.

Разработана модель вебер-амперной характеристики ДПТ типа ТЕ-022, которая формируется с учетом текущих значений токов ПОВ и якоря.

Установлена зависимость для определения коэффициента ослабления поля (тока) в функции заданного значения тока якоря и текущего значения скорости исходя из вебер-амперной характеристики ДПТ и предельного значения ЭДС якоря, обеспечивающая разгон и торможение ТЭП с заданным током якоря.

Список литературы: 1. Кривовяз В. Тяговый электропривод постоянного тока модернизированного трамвайного вагона «Татра – 3Е» / В. Кривовяз, П. Васильев, В. Маевский // Силовая электроника – 2007. – № 3. – С. 36-38. 2. 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. – Випуск № 67, – С. 31-35. 3. Шав'юлкін О. О. Перетворювальна техніка: навч. посібник / О. О. Шав'юлкін, О. М. Наливайко. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – 328 с. 4. Далека В. Х. Основи електричної тяги: навч. посібник / В. Х. Далека, П. М. Пушков, В. П. Андрійченко, Ю. В. Мінєєва. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 312 с. 5. Корягина Е. Е. Электрооборудование трамваев и троллейбусов / Е. Е. Корягина, О. А. Коськин. – М.: Транспорт, 1982. – 296 с.

Bibliography (transliterated): 1. Krivovjazy V. Tjagovyj jelektroprivod postojannogo toka modernizirovannogo tramvajnoho vagona «Tatra – 3E». V. Krivovjazy, P. Vasil'ev, V. Maevskij. Silovaja jelektronika. 2007. No 3. 36-38. Print. 2. Andriychenko V. P. Vdoskonalennya sposobu rehulyuvannya zbudzhennya tyahovykh dyvuhniv postynnoho strumu. V. P. Andriychenko, S. O. Zakurday, I. O. Kostenko. Skhidno-Yevropeys'kyj zhurnalпередовykh tekhnolohiy. 2014. No 67. 31-35. Print. 3. Shav'olkin O. O. Peretvoryval'na tekhnika: navch. posibnyk. O. O. Shav'olkin, O. M. Nalyvayko. Kramators'k: DDMA, 2008. Print. 4. Daleka V. H. Osnovy elektrichnoyi tyahy: navch. posibnyk. V. H. Daleka, P. M. Pushkov, V. P. Andriychenko, Y. V. Minyeyeva. – Kharkov: KNAME, 2012. Print. 5. Korjagina E. E. Jelektrooborudovanie tramvaev i trojlejbusov. E. E. Korjagina, O. A. Kos'kin. – Moscow: Transport, 1982. Print.

Поступила (received) 05.10.2015



Шав'юлкін Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені А. Н. Бекетова, професор кафедри «Електричного транспорту»; тел.: (050) 972-06-29; e-mail: shavelkin57@mail.ru.

Shavelkin Aleksandr Alekseevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Professor at the Department of Electric Transport; tel.: (050) 972-06-29; e-mail: shavelkin57@mail.ru.



Герасименко Виталий Анатольевич – Харківський національний університет міського господарства імені А. Н. Бекетова, асистент кафедри «Електричного транспорту»; тел.: (099) 388-30-28; e-mail: nrng@ya.ru.

Gerasymenko Vitaliy Anatolevich – O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Assistant at the Department of Electric Transport; tel.: (099) 388-30-28; e-mail: nrng@ya.ru.



Кожемякин Сергей Михайлович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший преподаватель кафедри «Общая электротехника»; тел.: (095) 737-25-77; e-mail: s.kozhemyakin@mail.ru.

Kozhemyakin Sergei Mikhailovich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer at the Department of General electrical engineering; tel.: (095) 737-25-77; e-mail: s.kozhemyakin@mail.ru.