

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Досліджуються декілька варіантів схем бортового джерела живлення, що забезпечує утилізацію кінетичної енергії електротранспортного засобу при гальмуванні з подальшим використанням її під час розгону і руху. Проводиться порівняльний аналіз енергетичних характеристик цих варіантів на їх відповідність вимогам електропривода.

Исследуется несколько вариантов схем бортового источника питания, который обеспечивает утилизацию кинетической энергии электротранспортного средства при торможении с последующим использованием её при разгоне и движении. Проводится сравнительный анализ энергетических характеристик этих вариантов на их соответствие требованиям электропривода.

A few variants of side source electric energy, which provides utilization of kinetic energy of electro mobile at braking with the subsequent use of her at acceleration and motion, are explored. To be conducted comparative analysis of power descriptions of these variants on their accordance to the requirements of electro drive.

Одним из достоинств электротранспортного средства (ЭТС) является использование электрической машины в качестве источника механической энергии. Поскольку электрическая машина обладает свойством обратимости и может работать не только в двигательном режиме, но и в режиме генератора, то при торможении это позволяет преобразовывать механическую энергию ЭТС в электрическую. Если обеспечить накопление этой энергии в бортовом источнике питания (БИП), то теоретически это позволит дополнительно сэкономить до 20 % энергии, потребляемой при разгоне и движении ЭТС [2]. Для накопления электрической энергии, генерируемой электроприводом (ЭП) при торможении ЭТС, рекомендуется использовать не только аккумуляторную батарею (АБ), но и конденсаторную батарею (КБ) большой ёмкости [1, 3].

Для максимального использования энергии, генерируемой ЭП при торможении ЭТС, необходимо, чтобы энергетические характеристики БИП и ЭП наилучшим образом соответствовали одна другой. В связи с этим возникает проблема выбора и оптимизации параметров основных функциональных узлов, входящих в состав БИП.

На рис.1. показана упрощённая схема подключения ЭП к БИП и указаны направления токов, соответствующие режиму торможения ЭТС. В этом режиме ЭП генерирует электрическую энергию, которая поступает в АБ и на вход преобразователя напряжения конденсаторной батареи (ПР-КБ).

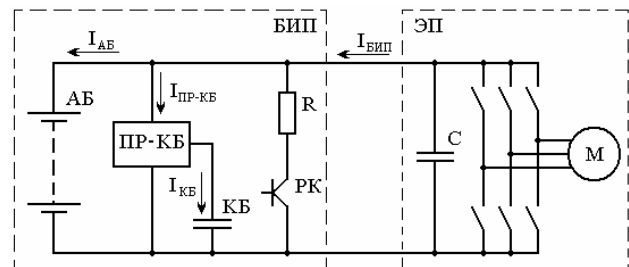


Рис.1. Упрощённая схема подключения ЭП к БИП

При этом электрическая энергия должна поступать в АБ в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к режиму заряда аккумуляторной батареи, а именно ток заряда АБ ($I_{АБ}$) и напряжение на ее зажимах ($U_{АБ}$) не должны превышать допустимых значений. Поскольку значение тока $I_{БИП}$ определяется только режимом работы ЭП и фактически является внешним возмущающим воздействием для БИП, то при управлении током $I_{ПР-КБ}$ фактически осуществляется регулирование тока заряда или

разряда АБ. Если использовать информацию о значении тока $I_{АБ}$, то можно с помощью ПР-КБ поддерживать значение тока заряда и разряда АБ на требуемом уровне.

На рис.2 приведена диаграмма тока, потребляемого и генерируемого ЭП при разгоне и торможении ЭТС массой 7000 кг до скорости 80 км/час с ускорением 1 м/с^2 [4]. Из этой диаграммы следует, что при разгоне ЭТС (интервал времени от 0 до 21 с) ток, потребляемый ЭП, возрастает от нуля (если не считать тока заряда конденсатора С, который входит в состав ЭП) до максимального значения $I_{П \text{ МАХ}}$, а при торможении ЭТС (интервал времени от 28 с до 49 с) ток, генерируемый ЭП в БИП уменьшается от большого отрицательного значения $-I_{Т \text{ МАХ}}$ до нуля.

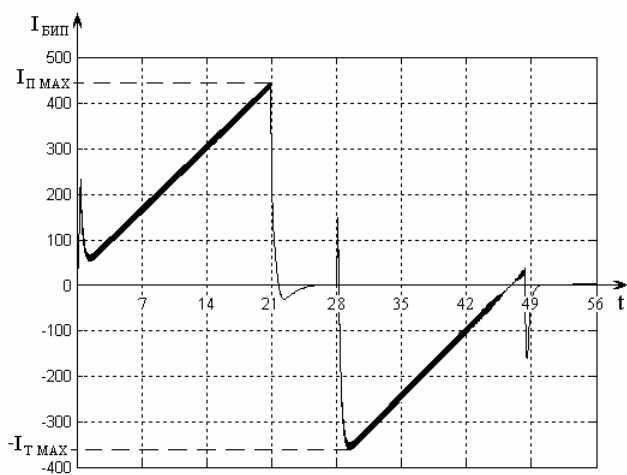


Рис.2. Диаграмма тока БИП при разгоне и торможении ЭТС

В режиме разгона ЭТС электрическая энергия от БИП поступает в ЭП. В этом режиме для увеличения срока службы АБ ток разряда АБ не должен превышать допустимого значения. Если ЭП потребляет от БИП значение тока, превышающее предельно-допустимое значение тока разряда АБ, то это превышение тока должно быть обеспечено с помощью ПР-КБ за счёт разряда КБ.

В режиме торможения ЭТС значение тока ($I_{БИП}$), поступающего от ЭП в БИП, может существенно превышать допустимое значение тока заряда АБ ($I_{АБ}$), поэтому для увеличения срока службы АБ избыток тормозного тока ($I_{ПР-КБ}$) должен через ПР-КБ поступать в КБ. В том случае, если ток $I_{БИП}$, генерируемый ЭП (например, при экстрен-

ном торможении ЭТС) будет превышать возможности ПР-КБ, то будет увеличиваться ток заряда АБ. Превышение током заряда АБ предельно-допустимого значения приведёт к преждевременной порче аккумуляторов и необходимости их замены, что существенно увеличит эксплуатационные расходы ЭТС. Для ограничения тока заряда АБ в рассматриваемой схеме (рис.1) используется разрядный ключ (РК). В результате его применения избыток электрической энергии, генерируемой ЭП, расходуется на тепловые потери в балластном резисторе R, а не накапливается в КБ.

На основании изложенного можно сформулировать требования к режимам работы ПР-КБ при разгоне и торможении ЭТС. Так, при разгоне ЭТС ПР-КБ совместно с АБ должен генерировать ток, значение которого увеличивается от нуля до максимального значения $I_{П \text{ МАХ}}$, соответствующего мощности электрической энергии, потребляемой ЭП при максимальной скорости движения ЭТС. При торможении ЭТС необходимо, чтобы ПР-КБ совместно с АБ потреблял от ЭП ток, значение которого уменьшается от максимального значения $-I_{Т \text{ МАХ}}$, соответствующего мощности электрической энергии, генерируемой ЭП при максимальной скорости движения ЭТС, до нуля. В связи с этим необходимо исследовать возможность реализации указанных режимов работы с помощью ПР-КБ. Для этого рассмотрим несколько вариантов схемной реализации ПР-КБ. При этом будем полагать, что наличие потерь в ПР-КБ проявляется в уменьшении напряжения на выходе ПР-КБ из-за падения напряжения на его элементах и никак не влияет на значение выходного тока.

В схеме БИП, показанной на рис.1, преобразователь ПР-КБ может быть реализован по трём вариантам. Рассмотрим каждый вариант преобразователя ПР-КБ и определим возможность реализации ими требуемых режимов работы. В первом варианте напряжение на КБ может изменяться только в первой зоне от минимального напряжения $U_{КБ \text{ МИН}}$ до максимального $U_{КБ \text{ МАХ}}$, причём $U_{КБ \text{ МИН}} \leq U_{КБ \text{ МАХ}} \leq U_{АБ}$.

В состав 1-го варианта схемы ПР-КБ (рис.3) входит дроссель L1, транзисторные

ключи VT1 и VT2 с обратными диодами VD1 и VD2, а также система регулирования тока (СРТ), протекающего через дроссель L1 в том или ином направлении в зависимости от требуемого режима работы ПР-КБ. При запертых транзисторных ключах VT1 и VT2 не происходит ни заряд, ни разряд КБ. Она остаётся заряженной до некоторого напряжения $U_{КБ\text{ MIN}} \leq U_{КБ} \leq U_{КБ\text{ MAX}}$. Для увеличения заряда КБ транзисторный ключ VT1 должен работать со скважностью γ_{VT1} , а транзисторный ключ VT2 должен быть заперт. При этом напряжение между точками В и С представляет собой последовательность прямоугольных импульсов амплитудой $U_{АБ}$ и скважностью γ_{VT1} . Поэтому среднее значение напряжения между точками В и С определяется выражением

$$U_{BC} = \eta_{ПР-КБ} U_{АБ} \gamma_{VT1},$$

где $\eta_{ПР-КБ}$ – коэффициент полезного действия ПР-КБ при заряде КБ, который учитывает падение напряжения на элементах преобразователя ПР-КБ (в данном случае на транзисторе VT1).

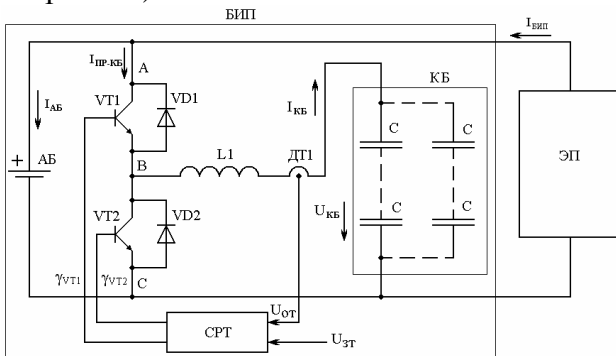


Рис.3. Упрощённая схема подключения ЭП к БИП при регулировании напряжения на КБ по 1-му варианту

Если $U_{КБ} < U_{BC}$, то при работе VT1 с постоянной скважностью через дроссель L1 начнёт протекать ток, и напряжение на КБ начнёт увеличиваться, пока не достигнет установившегося значения, равного U_{BC} . Следовательно, в установившемся режиме значение напряжения на КБ определяется выражением

$$U_{КБ} = \eta_{ПР-КБ} U_{АБ} \gamma_{VT1}. \quad (1)$$

При работе СРТ в штатном режиме в дросселе L1 протекает непрерывный ток I_{L1} , среднее значение которого определяется сигналом задания тока $U_{ЗТ}$, а амплитуда

пульсации зависит от индуктивности дросселя, частоты коммутации транзисторного ключа VT1 и скважности γ_{VT1} . Поскольку ток заряда КБ $I_{КБ} = I_{L1}$, то напряжение на КБ увеличивается и для поддержания заданного значения тока в дросселе L1 СРТ будет регулировать скважность γ_{VT1} . Теоретически при изменении скважности γ_{VT1} от нуля до единицы напряжение на КБ увеличится от нуля до

$$U_{КБ\text{ MAX}} = \eta_{ПР-КБ} U_{АБ}. \quad (2)$$

При отсутствии потерь в ПР-КБ ($\eta_{ПР-КБ} = 1$) $U_{КБ\text{ MAX}} = U_{АБ}$.

Если пренебречь пульсацией тока I_{L1} , то ток $I_{ПР-КБ}$, потребляемый ПР-КБ, представляет собой последовательность прямоугольных импульсов амплитудой I_{L1} и скважностью γ_{VT1} . Поэтому среднее значение тока $I_{ПР-КБ}$ определяется выражением

$$I_{ПР-КБ} = \gamma_{VT1} I_{L1}. \quad (3)$$

Следовательно, при регулировании скважности γ_{VT1} изменяется соотношение значений тока $I_{ПР-КБ}$, потребляемого ПР-КБ и тока I_{L1} , протекающего в дросселе L1. В частности, если значение тока I_{L1} будет постоянным, благодаря работе СРТ, то значение тока, потребляемого ПР-КБ, будет зависеть только от значения γ_{VT1} . При увеличении скважности γ_{VT1} от нуля до единицы ток $I_{ПР-КБ}$ увеличивается от нуля до I_{L1} . В результате, мощность электрической энергии, потребляемой ПР-КБ, также будет увеличиваться от нуля до максимального значения P_{MAX} в соответствии с выражением

$$P_{ПР-КБ} = U_{АБ} I_{ПР-КБ} = \gamma_{VT1} U_{АБ} I_{L1}. \quad (4)$$

$$P_{MAX} = U_{АБ} I_{L1}.$$

Аналогично, мощность электрической энергии, потребляемой КБ, определяется выражением

$$P_{КБ} = U_{КБ} I_{L1} = \eta_{ПР-КБ} \gamma_{VT1} U_{АБ} I_{L1}. \quad (5)$$

Таким образом, выражение (4) можно представить в виде

$$P_{ПР-КБ} = \frac{P_{КБ}}{\eta_{ПР-КБ}}. \quad (6)$$

После преобразований получим

$$I_{ПР-КБ} = \frac{U_{КБ} I_{L1}}{\eta_{ПР-КБ} U_{АБ}}. \quad (7)$$

На рис.4 показаны графики изменения тока $I_{ПР-КБ}$ и мощности электрической энер-

гии $P_{\text{ПР-КБ}}$, потребляемых ПР-КБ, при максимальном значении тока I_{L1} , протекающем в дросселе, и при изменении напряжения на КБ в 1-й зоне ($U_{\text{КБ MIN}} \leq U_{\text{КБ}} < U_{\text{АБ}}$).

Таким образом, если при торможении ЭТС электрическая энергия поступает в КБ с максимальным постоянным значением тока I_{L1} и напряжение на КБ увеличивается от $U_{\text{КБ MIN}}$ до $U_{\text{КБ MAX}}$ (2), то в соответствии с (5) и (6) мощность электрической энергии, потребляемой ПР-КБ, увеличиваются от минимального $P_{\text{ПР-КБ MIN}}$ до максимального значения P_{MAX} . При этом согласно (7) ток, потребляемый ПР-КБ, также увеличивается от минимального $I_{\text{ПР-КБ MIN}}$ до максимального значения $I_{\text{MAX}} = I_L$. Но в соответствии с диаграммой тока, приведенной на рис.2, при торможении ЭТС мощность электрической энергии и ток, генерируемые ЭП, уменьшаются от большого отрицательного значения до нуля по мере уменьшения скорости ЭТС [1].

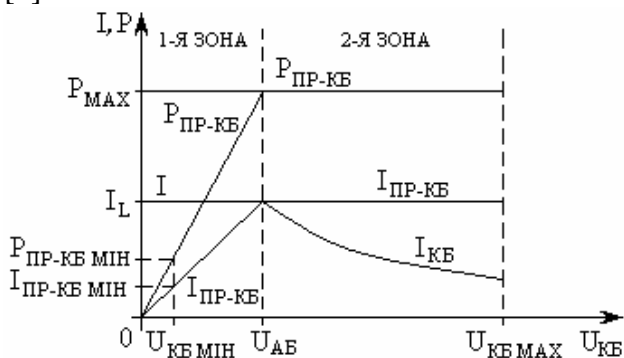


Рис.4. Графики изменения тока и мощности, потребляемых ПР-КБ, в 1-й и во 2-й зонах при отсутствии потерь энергии в ПР-КБ

При пуске ЭП часть необходимой электрической энергии будет поступать из КБ, поэтому её заряд и напряжение будут уменьшаться. Для реализации этого режима транзисторный ключ VT2 должен работать с некоторой скважностью γ_{VT2} , а транзисторный ключ VT1 должен быть заперт. При проводящем состоянии VT2 ток I_{L1} и электромагнитная энергия в дросселе L1 увеличиваются, а при непроводящем состоянии VT2 под действием ЭДС самоиндукции дросселя L1 ток I_{L1} протекает через обратный диод VD1. Ток разряда КБ $I_{\text{КБ}} = I_{L1}$. В этом режиме КБ является источником элек-

трической энергии и ПР-КБ генерирует ток $I_{\text{ПР-КБ}}$, среднее значение которого определяется выражением

$$I_{\text{ПР-КБ}} = (1 - \gamma_{\text{VT2}}) I_{L1}.$$

В установившемся режиме при работе VT2 с постоянным значением скважности γ_{VT2} среднее значение напряжения на КБ будет постоянным и равным U_{BC}

$$U_{\text{КБ}} = U_{\text{BC}} = \frac{U_{\text{АБ}}(1 - \gamma_{\text{VT2}})}{\eta'_{\text{ПР-КБ}}}, \quad (8)$$

где $\eta'_{\text{ПР-КБ}}$ – коэффициент полезного действия ПР-КБ при разряде КБ.

Мощности электрической энергии, генерируемой ПР-КБ и потребляемой от КБ, изменяются в соответствии с выражениями

$$P_{\text{ПР-КБ}} = U_{\text{АБ}} I_{\text{ПР-КБ}} = (1 - \gamma_{\text{VT2}}) U_{\text{АБ}} I_{L1}. \quad (9)$$

$$P_{\text{КБ}} = U_{\text{КБ}} I_{L1} = \frac{U_{\text{АБ}}(1 - \gamma_{\text{VT2}})}{\eta'_{\text{ПР-КБ}}} I_{L1}. \quad (10)$$

С учётом (10) выражение (9) можно переписать в виде

$$P_{\text{ПР-КБ}} = P_{\text{КБ}} \eta'_{\text{ПР-КБ}}. \quad (11)$$

После преобразований получим

$$I_{\text{ПР-КБ}} = \frac{\eta'_{\text{ПР-КБ}} U_{\text{КБ}} I_{L1}}{U_{\text{АБ}}}. \quad (12)$$

Следовательно, при отсутствии потерь в ПР-КБ ($\eta_{\text{ПР-КБ}} = 1$, $\eta'_{\text{ПР-КБ}} = 1$) графики изменения тока и мощности, которые потребляются и генерируются ПР-КБ, являются одними и теми же (рис.4). Отличие состоит только в том, что рабочая точка по ним будет перемещаться в противоположных направлениях.

Поскольку при разгоне ЭТС электрическая энергия поступает из КБ, то напряжение на КБ уменьшается от $U_{\text{АБ}}$ до $U_{\text{КБ MIN}}$. При этом согласно выражениям (10), (11) и (12) мощность электрической энергии и ток, генерируемые ПР-КБ, уменьшаются от максимального значения до минимального значения даже при максимально-возможном постоянном значении тока I_{L1} . Но в соответствии с диаграммой тока, приведенной на рис.2, вначале процесса разгона мощность электрической энергии и ток, потребляемые ЭП, являются минимальными и увеличиваются по мере увеличения скорости движения ЭТС [1].

Следовательно, энергетические характеристики 1-го варианта схемы ПР-КБ не соот-

ветствуют требованиям ЭП ни при разгоне, ни при торможении ЭТС.

Во втором варианте ПР-КБ напряжение на КБ может изменяться только во второй зоне от U_{AB} до $U_{KB\text{ MAX}}$ (где $U_{KB\text{ MAX}} \geq U_{AB}$). Рассмотрим 2-й вариант схемы ПР-КБ (рис.5), в состав которой входят: дроссель $L1$, транзисторные ключи $VT3$ и $VT4$ с обратными диодами $VD3$ и $VD4$, а также СРТ.

При запертых транзисторных ключах $VT3$ и $VT4$ происходит процесс заряда КБ через обратный диод $VD3$ до напряжения U_{AB} . Вследствие этого напряжение на КБ не может быть меньше напряжения на АБ (если не учитывать падения напряжения на диоде $VD3$). Необходимо также отметить, что для рассматриваемой схемы ПР-КБ понятия входной ток преобразователя $I_{ПР-КБ}$ и ток дросселя I_{L1} совпадают.

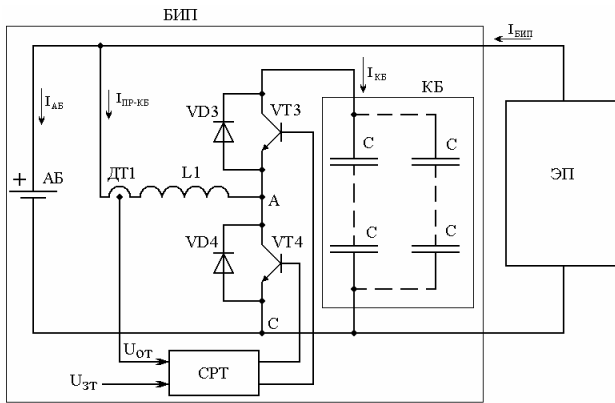


Рис.5. Упрощённая схема подключения ЭП к БИП при регулировании напряжения на КБ по 2-му варианту

Для увеличения заряда КБ транзисторный ключ $VT4$ должен работать с некоторой скважностью γ_{VT4} , а транзисторный ключ $VT3$ должен быть заперт. При открытом ключе $VT4$ мгновенное значение напряжения между точками А и С $u_{AC} \approx 0$, ток I_{L1} увеличивается, в индуктивности дросселя $L1$ накапливается электромагнитная энергия. При закрытом ключе $VT4$ под действием ЭДС самоиндукции ток I_{L1} будет протекать через обратный диод $VD3$ в КБ. На этом интервале времени мгновенное значение напряжения между точками А и С равно

$$u_{AC} = \frac{U_{KB}}{\eta_{ПР-КБ}}.$$

Поэтому среднее значение напряжения между точками А и С определяется выражением

$$U_{AC} = \frac{U_{KB}(1 - \gamma_{VT4})}{\eta_{ПР-КБ}}. \quad (13)$$

В установившемся режиме $U_{AC} = U_{AB}$ и с учётом (13) напряжение на КБ определяется выражением

$$U_{KB} = \eta_{ПР-КБ} \frac{U_{AB}}{1 - \gamma_{VT4}}. \quad (14)$$

Практически $0 < \gamma_{VT4} < 1$. Значение γ_{VT4} может стремиться к единице, но должно быть меньше её, поскольку при $\gamma_{VT4} = 1$ ток в дросселе увеличится до бесконечности, а КБ заряжаться не будет. В соответствии с (14), при увеличении скважности γ_{VT4} от нуля до единицы напряжение на КБ будет превышать U_{AB} . Чтобы при заряде КБ обеспечить требуемое значение тока I_{L1} , необходимо увеличивать значение скважности γ_{VT4} по мере заряда КБ. При этом теоретически напряжение на КБ может увеличиваться от U_{AB} до бесконечности. Если пренебречь пульсациями тока I_{L1} , то потребляемый КБ ток I_{KB} представляет собой последовательность прямоугольных импульсов амплитудой I_{L1} и скважностью $(1 - \gamma_{VT4})$. В результате среднее значение тока I_{KB} определяется выражением

$$I_{KB} = (1 - \gamma_{VT4}) I_{L1} = (1 - \gamma_{VT4}) I_{ПР-КБ}.$$

Следовательно, при $I_{L1} = \text{const}$ значение тока, потребляемого КБ, зависит от значения γ_{VT4} . Увеличение скважности γ_{VT4} приводит к уменьшению тока I_{KB} от I_{L1} до нуля. При этом мощность электрической энергии, потребляемой ПР-КБ, будет постоянной

$$P_{ПР-КБ} = U_{AB} I_{ПР-КБ} = U_{AB} I_{L1}. \quad (15)$$

Мощность энергии, потребляемой КБ, также будет постоянной

$$P_{KB} = U_{KB} I_{KB} = \eta_{ПР-КБ} U_{AB} I_{L1}. \quad (16)$$

Таким образом, при отсутствии потерь в ПР-КБ ($\eta_{ПР-КБ} = 1$) значения мощности электрической энергии, потребляемой ПР-КБ и КБ, равны, не зависят от значения скважности γ_{VT4} , и, следовательно, от значения U_{KB} и определяются только значениями напряжения на АБ и тока, протекающего в дросселе. На основании выражений (15) и (16) можно получить формулу для определения тока заряда КБ

$$I_{\text{КБ}} = \frac{\eta'_{\text{ПР-КБ}} U_{\text{АБ}} I_{\text{L1}}}{U_{\text{КБ}}}.$$

На рис.4 показаны графики изменения тока и мощности, потребляемых ПР-КБ, при работе во 2-й зоне ($U_{\text{КБ}} > U_{\text{АБ}}$).

При разряде КБ транзисторный ключ VT3 должен работать с некоторой скважностью γ_{VT3} , а транзисторный ключ VT4 должен быть запертым. При этом ток $I_{\text{ПР-КБ}} = I_{\text{L1}}$ протекает через дроссель L1 в обратном направлении. Среднее значение напряжения между точками А и С определяется выражением

$$U_{\text{АС}} = \eta'_{\text{ПР-КБ}} \gamma_{\text{VT3}} U_{\text{КБ}}. \quad (17)$$

Поскольку при постоянном значении γ_{VT3} в установившемся режиме $U_{\text{АС}} = U_{\text{АБ}}$, то

$$U_{\text{КБ}} = \frac{U_{\text{АБ}}}{\eta'_{\text{ПР-КБ}} \gamma_{\text{VT3}}}.$$

Среднее значение тока разряда КБ определяется выражением

$$I_{\text{КБ}} = \gamma_{\text{VT3}} \cdot I_{\text{L1}}. \quad (18)$$

Если разделить (17) на (18), то после преобразований получим выражение, которое определяет соотношения между средними значениями токов и напряжений на входе и выходе ПР-КБ при разряде КБ

$$U_{\text{АБ}} I_{\text{L1}} = \eta'_{\text{ПР-КБ}} U_{\text{КБ}} I_{\text{КБ}}, \quad (19)$$

$$P_{\text{ПР-КБ}} = \eta'_{\text{ПР-КБ}} P_{\text{КБ}}, \quad (20)$$

$$I_{\text{КБ}} = \frac{U_{\text{АБ}} I_{\text{L1}}}{\eta'_{\text{ПР-КБ}} U_{\text{КБ}}}. \quad (21)$$

Таким образом, при отсутствии потерь в ПР-КБ ($\eta'_{\text{ПР-КБ}}=1$) мощности электрической энергии, генерируемой ПР-КБ и КБ, равны, не зависят от значения скважности γ_{VT3} , (и, следовательно, от значения $U_{\text{КБ}}$) и определяются только значениями напряжения на АБ и тока I_{L1} , протекающего в дросселе.

Таким образом, регулируя скважности γ_{VT3} и γ_{VT4} , можно регулировать ток I_{L1} , протекающий в дросселе L1. При отсутствии потерь в ПР-КБ графики изменения тока и мощности, потребляемых и генерируемых ПР-КБ, являются одними и теми же. При постоянном значении тока I_{L1} , протекающего в дросселе L1, 2-й вариант схемы ПР-КБ обеспечивает постоянные значения тока и мощности электрической энергии, потребляемой или генерируемой ПР-КБ, в отличие от 1-го варианта схемы ПР-КБ. Если выбрать пара-

метры АБ и ПР-КБ так, чтобы максимальное значение тока ($I_{\text{L1}}+I_{\text{АБ}}$) превышало максимальное значение тока потребляемого или генерируемого ЭП, то регулируя значение тока в дросселе L1, можно регулировать значения тока и мощности электрической энергии, потребляемой и генерируемой ПР-КБ, так чтобы обеспечить потребности ЭП при разгоне и торможении ЭТС. При этом ток заряда и разряда АБ не будет превышать предельно-допустимых значений.

В третьем варианте напряжение на КБ может изменяться в двух зонах от $U_{\text{КБ min}}$ до $U_{\text{КБ max}}$ (где $U_{\text{КБ min}} \leq U_{\text{АБ}}$, а $U_{\text{КБ max}} \geq U_{\text{АБ}}$). В состав 3-го варианта схемы ПР-КБ (рис.6) входят: дроссель L1, четыре транзисторных ключа VT1,...VT4 с обратными диодами VD3,...VD4, а также СРТ. Фактически эта схема является результатом объединения схем, соответствующих 1-му и 2-му вариантам ПР-КБ и обеспечивает регулирование напряжения на КБ как в 1-й, так и во 2-й зонах. Графики изменения тока и мощности, потребляемых ПР-КБ в 1-й и во 2-й зонах соответствуют графикам, показанным на рис.4.

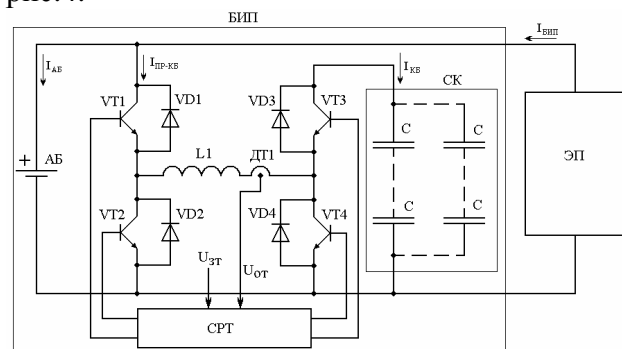


Рис.6. Упрощённая схема подключения ЭП к БИП при регулировании напряжения на КБ по 3-му варианту

Максимальная мощность электрической энергии, потребляемой и генерируемой ПР-КБ, определяется максимальными значениями напряжения на АБ и тока, протекающего в дросселе L1.

В 1-м варианте схемы ПР-КБ имеет место явное несоответствие энергетических характеристик требованиям ЭП при торможении и пуске ЭТС. Так, например, в начале процесса торможения ЭТС в БИП от ЭП будет поступать большой ток. Поскольку при этом КБ будет разряжена и $U_{\text{КБ}}$ будет не-

лико, то согласно (7) ПР-КБ будет потреблять малый ток $I_{ПР-КБ}$. В результате в АБ будет поступать слишком большой ток заряда. Поэтому для предотвращения повреждения АБ придётся включить РК или механический тормоз, что приведёт к потере кинетической энергии, накопленной в ЭТС. В конце процесса разгона ЭТС ЭП будет потреблять от БИП недопустимо большой ток, который не сможет обеспечить ПР-КБ (12), ввиду недостаточно большого тока $I_{Л1}$ и напряжения на КБ. В результате АБ будет перегружена по току разряда, что сократит срок её работы. Для предотвращения перегрузки АБ по току разряда придётся многократно увеличить её ёмкость и, следовательно, многократно увеличить вес, объём и стоимость АБ.

Энергетические характеристики 2-го и 3-го вариантов схемы ПР-КБ (работающих во 2-й зоне) в большей мере соответствуют требованиям ЭП при пуске и при торможении ЭТС, в отличие от энергетических характеристик 1-го варианта. Поэтому можно будет обеспечить полное накопление энергии торможения ЭТС при использовании АБ и КБ значительно меньшей ёмкости.

В 3-м варианте схемы ПР-КБ используется в 2 раза больше транзисторных ключей, поэтому он будет примерно в два раза дороже 1-го и 2-го вариантов схемы ПР-КБ. Кроме того, при заряде и разряде КБ ток всегда будет протекать через один транзистор и один обратный диод, поэтому потери энергии в 3-м варианте схемы ПР-КБ будут примерно в два раза больше, чем в 1-м и во 2-м вариантах. К достоинствам 3-го варианта схемы ПР-КБ можно отнести увеличение коэффициента использования энергии, накопленной в КБ, благодаря увеличению кратности регулирования напряжения на КБ [1].

Таким образом, в большинстве случаев для накопления и повторного использования кинетической энергии ЭТС можно рекомендовать 2-й вариант схемы ПР-КБ.

Список использованной литературы

1. Вершинин Д.В. Система регулирования тока батареи конденсаторов бортового источника питания электротранспортного средства. / Вершинин Д.В., Войтенко В.А.,

Смотров Е.А. // Электромашинобуд. та електрообладн. – К.: Техніка. – 2009. – Вип. 73. – С. 43–49.

2. Вершинин Д.В. Визначення параметрів основних вузлів електричної схеми електробуса. / Вершинин Д.В., Войтенко В.А., Смотров Є.О. // Электромашинобуд. та електрообладн. – К.: Техніка. – 2009. – Вип. 74. – С. 10–17.

3. Визначення параметрів бортового джерела живлення транспортного засобу з електроприводом. / Вершинин Д.В., Водичев В.А., Войтенко В.А., Смотров Є.О. // Тематич. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРО-ІНФОРМ». – Львів: ЕКОінформ. – 2009. – С. 406–407.

4. Особенности выбора параметров бортового источника питания электротранспортного средства. / Д.В. Вершинин, В.А. Водичев, В.А. Войтенко, Е.А. Смотров // Электромашинобуд. та електрообладн. – К.: Техніка. – 2008. – Вип. 71. – С. 5–11.

Получено 18. 10. 2010



Войтенко
Владимир Андреевич,
канд.техн.наук, доцент каф.
ЕМС КУ Одеск. нац. политехн.
ун-ту.
Тел. 048-734-84-67



Смотров
Евгений Александрович,
канд. техн. наук, заведующий
сектором ОСКБ Специальных
Станков.
тел. 048-728-85-05



Вершинин
Дмитрий Вениаминович,
инженер-исследователь
ОСКБ Специальных Станков.
тел. 048-728-85-05