

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕИ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Досліджується автономне джерело живлення, що забезпечує накопичення кінетичної енергії електротранспорту при гальмуванні. Як накопичувач електричної енергії використовуються конденсаторна батарея великої ємності. Пропонується методика оптимізації параметрів конденсаторної батареї за масою, об'ємом та вартістю.

Исследуется автономный источник питания, обеспечивающий накопление кинетической энергии электротранспортного средства при торможении. В качестве накопителя электрической энергии используются конденсаторная батарея большой ёмкости. Предлагается методика оптимизации параметров конденсаторной батареи по массе, объёму и стоимости.

The side source of energy, providing utilization of kinetic energy of electromobile at braking with the subsequent use of her at acceleration and motion, is explored. As the store of electric energy is used condenser battery of large capacity. The method of optimization of parameters of condenser battery on mass, volume and cost is offered.

Важнейшей особенностью электротранспортного средства (ЭТС) является возможность преобразования кинетической энергии механизма в электрическую энергию при торможении ЭТС и накопления её при торможении ЭТС в бортовом источнике питания (БИП) с последующем использовании накопленной энергии при движении ЭТС. Ток, поступающий в БИП при торможении ЭТС, может достигать сотен и даже тысяч ампер, а рекомендуемый ток заряда аккумуляторных батарей (АБ) обычно не превышает десятков ампер. Поэтому использование АБ в качестве накопителей электрической энергии при торможении ЭТС сопровождается значительным сокращением срока её эксплуатации. Поэтому для накопления электрической энергии рекомендуется использовать конденсаторную батарею (КБ), состоящую из ионисторов (конденсаторов большой ёмкости) [2], которые характеризуются достаточно большим током заряда и разряда. Наличие КБ в составе БИП позволяет увеличить как срок службы АБ, так и пробег ЭТС на однократном заряде АБ [1].

Поскольку размеры и масса КБ могут быть сопоставимы с аналогичными показателями АБ, то задачей статьи является оптимизация ёмкости и напряжения КБ с учётом

количества накапливаемой энергии для уменьшения её массы, объёма и стоимости.

На рис.1. показана упрощённая функциональная схема тягового привода ЭТС, состоящая из БИП, преобразователя напряжения мотор-колеса (ПР-МК) и мотор-колеса (МК). На этой схеме указаны направления токов заряда АБ и КБ, в режиме торможения ЭТС. В этом режиме МК генерируют электрическую энергию, которая поступает через ПР-МК в АБ и на вход преобразователя напряжения конденсаторной батареи (ПР-КБ). При этом в АБ электрическая энергия должна поступать 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 тормозного тока ($I_{БИП}$), поступающего от ПР-МК в БИП, может существенно превышать допустимое значение тока заряда АБ, то избыток тормозного тока ($I_{ПР-КБ}$) должен через ПР-КБ поступать в КБ.

В режиме разгона ЭТС (рис. 1) электрическая энергия от АБ и КБ поступает в ПР-МК и далее в МК. В этом режиме для увеличения срока службы АБ ток разряда АБ также не должен превышать допустимого значения. Если ПР-МК потребляет от БИП ток, значение которого превышает предельно-допустимое значение тока разряда АБ, то не-

достающее значение тока должно поступать от КБ с помощью ПР-КБ. Поскольку максимальное напряжение на КБ ограничено предельно-допустимым значением $U_{КБ\ MAX}$, то при движении ЭТС важно с помощью ПР-КБ разрядить КБ до достаточно малого значения напряжения, соответствующего значению скорости и количеству кинетической энергии, накопленной в ЭТС на этой скорости. Тогда при рекуперации энергии торможения ЭТС напряжение на КБ не превысит предельно-допустимого значения $U_{КБ\ MAX}$. Таким образом, при движении ЭТС значение напряжения на КБ должно быть, с одной стороны, достаточно малым для того, чтобы КБ могла принять всю электрическую энергию, которую будут генерировать МК при возможном торможении ЭТС на этой скорости, а с другой стороны, – достаточно большим, чтобы обеспечить разгон ЭТС до максимальной скорости.

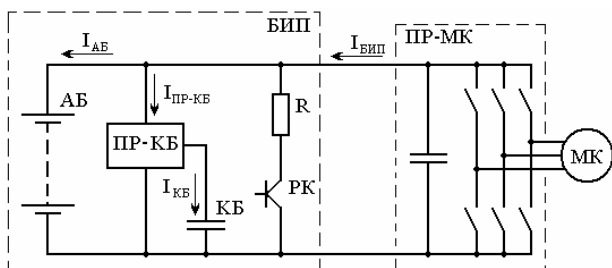


Рис.1. Упрощённая функциональная схема тягового привода ЭТС

Поскольку значение тока $I_{БИП}$ определяется только режимом работы ЭП и фактически является внешним возмущающим воздействием для БИП, то при управлении значением тока $I_{ПР-КБ}$ фактически осуществляется регулирование тока $I_{АБ}$. Поэтому ПР-КБ должен работать так, чтобы поддерживать значение тока заряда и разряда АБ на требуемом уровне.

В схеме БИП, показанной на рис.1, преобразователь ПР-КБ может быть реализован по трём вариантам. В первом варианте ПР-КБ регулирует напряжение на КБ только в 1-ой зоне от $U_{АБ}$ до $U_{КБ\ MIN}$ (где $U_{КБ\ MIN} \leq U_{АБ}$). Во втором варианте ПР-КБ регулирует напряжение на КБ только во 2-ой зоне от $U_{АБ}$ до $U_{КБ\ MAX}$ (где $U_{КБ\ MAX} \geq U_{АБ}$). В третьем варианте ПР-КБ регулирует напряжение на КБ в двух зонах от $U_{КБ\ MIN}$ до $U_{КБ\ MAX}$ (где

$U_{КБ\ MIN} \leq U_{АБ}$, а $U_{КБ\ MAX} \geq U_{АБ}$). Представляет интерес рассмотрение каждого варианта регулирования напряжения на КБ для выявления его достоинств и недостатков.

В том случае, если ток $I_{БИП}$, генерируемый МК при торможении, будет превышать максимальное значение тока, потребляемого ПР-КБ, то будет увеличиваться ток заряда АБ, который может превысить предельно-допустимое значение. Это приведёт к преждевременной порче аккумуляторов и их замене, что существенно увеличит эксплуатационные расходы ЭТС. В качестве аварийного средства ограничения тока заряда АБ в рассматриваемой схеме (рис.1) используется разрядный ключ (РК). При включении РК избыток электрической энергии расходуется на балластном резисторе R.

Для обеспечения нормального режима заряда АБ и сохранения максимального количества энергии, генерируемой МК при торможении ЭТС, необходимо, чтобы значение емкости КБ и параметры преобразователя ПР-КБ соответствовали запасу кинетической энергии в ЭТС и мощности, с которой эта энергия рекуперирована в БИП. В [2] требуемое значение ёмкости КБ определяется по условию полного преобразования максимального количества кинетической энергии в электрическую энергию заряда КБ при торможении ЭТС на горизонтальной дороге. Если принять КПД двигателя $\eta_{дв} \approx 0,85$, КПД преобразователей ПР-МК и ПР-КБ $\eta_{ПР-МК} \approx 0,95$ и $\eta_{ПР-КБ} \approx 0,96$, КПД механической части ЭТС $\eta_{М} \approx 0,97$, то количество электрической энергии, поступающей в БИП при торможении ЭТС, может быть оценено с помощью следующего выражения:

$$A_{Эл\ БИП} = A_{К} \cdot \eta_{М} \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{ПР-МК}, \text{ т.е.} \quad (1)$$

$$A_{Эл\ БИП} = \eta_{\Sigma} \cdot A_{К} = 0,78 \cdot A_{К}. \quad (2)$$

Количество электрической энергии, поступающей в КБ, будет меньше $A_{Эл\ БИП}$ на величину потерь энергии в ПР-КБ

$$\Delta A_{КБ} = A_{Эл\ БИП} \cdot \eta_{ПР-КБ} = 0,75 \cdot A_{К}. \quad (3)$$

В общем случае в схеме, приведенной на рис.1, напряжение на КБ может регулироваться в 1-й и во 2-й зонах в пределах от $U_{КБ\ MIN}$ до $U_{КБ\ MAX}$. Если принять количество электрической энергии, накопленной в КБ при напряжении $U_{АБ}$, в качестве базового

значения, то зависимость коэффициента использования энергии КБ при изменении напряжения на её клеммах от $U_{КБ\ MAX}$ до $U_{КБ\ MIN}$ будет определяться формулой

$$k_{И} = \frac{A_{КБ\ MAX} - A_{КБ\ MIN}}{A_{АБ}}$$

или

$$k_{И} = \frac{U_{КБ\ MAX}^2 - U_{КБ\ MIN}^2}{U_{АБ}^2}, \quad (4)$$

где $A_{КБ\ MAX}$, $A_{КБ\ MIN}$ и $A_{АБ}$ количество электрической энергии, накопленной в КБ, соответственно при напряжении на её клеммах $U_{КБ\ MAX}$, $U_{КБ\ MIN}$ и $U_{АБ}$.

При регулировании напряжения на КБ в 1-й зоне ($U_{КБ\ MAX} = U_{АБ}$, $U_{КБ\ MIN} \leq U_{АБ}$) выражение (4) может быть представлено в виде

$$k_{И1} = 1 - \frac{U_{КБ}^2}{U_{АБ}^2}, \quad \text{где } U_{КБ\ MIN} \leq U_{КБ} \leq U_{АБ}. \quad (5)$$

При регулировании напряжения на КБ во 2-й зоне ($U_{КБ\ MIN} = U_{АБ}$, $U_{КБ\ MAX} \geq U_{АБ}$) выражение для коэффициента использования энергии КБ во 2-й зоне:

$$k_{И2} = \frac{U_{КБ}^2}{U_{АБ}^2} - 1, \quad \text{где } U_{КБ\ MAX} \geq U_{КБ} \geq U_{АБ}. \quad (6)$$

В соответствии с выражениями (4)-(6) на рис.2 построен график зависимости коэффициента использования энергии КБ от минимального и максимального значений напряжения заряда и разряда КБ относительно $U_{АБ}$ при работе ПР-КБ в 1-й и во 2-й зонах.

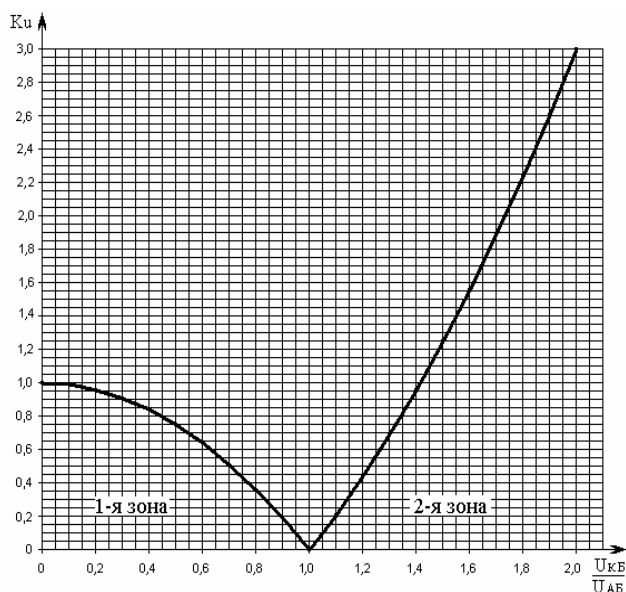


Рис.2. Зависимость коэффициента использования энергии КБ от напряжения заряда

Из этого графика видно, что в 1-й зоне при уменьшении напряжения $U_{КБ}$ на $0,5 U_{АБ}$ (от $U_{АБ}$ до $0,5 U_{АБ}$), КБ используется только на 75%. Во 2-й зоне при увеличении напряжения $U_{КБ}$ на $0,5 U_{АБ}$ (от $U_{АБ}$ до $1,5 U_{АБ}$), КБ используется на 125%. Поэтому если выбирать между преобразователями ПР-КБ, работающими только в 1-й или только во 2-й зоне, то целесообразно выбрать 2-й вариант.

Необходимо учитывать, что на рис.2 сравниваются КБ одинаковой ёмкости, но имеющие разные пределы изменения напряжения в 1-й и во 2-й зонах. Из рис.2 видно, что во 2-й зоне увеличение предельно-допустимого значения напряжения КБ сопровождается ростом коэффициента использования КБ по энергии. Но чем больше напряжение КБ, тем больше требуется конденсаторов, входящих в состав КБ, и тем больше масса, объем и стоимость КБ. В связи с этим представляет интерес оценка влияния предельно допустимого значения напряжения КБ на количество конденсаторов, из которых она должна состоять и, следовательно, на массу, объем и стоимость КБ при неизменной ёмкости КБ. Для этого рассмотрим две конденсаторные батареи одинаковой ёмкости КБ1 и КБ2, которые отличаются значениями предельно-допустимого напряжения. Каждая батарея состоит из нескольких одинаковых параллельных ветвей ($n_{ПАРi}$) последовательно включенных конденсаторов ($n_{ПОСЛi}$). Суммарное количество одинаковых конденсаторов, образующих КБ, равно ($n_{\Sigma i} = n_{ПАРi} \times n_{ПОСЛi}$). Если обозначить ёмкость каждого конденсатора C_K , а предельно-допустимое напряжение на его клеммах $U_{K\ MAX}$, то ёмкость КБ1 и КБ2 может быть определена так:

$$C_{КБ1} = \frac{n_{ПАР1} C_K}{n_{ПОСЛ1}}, \quad (7)$$

$$C_{КБ2} = \frac{n_{ПАР2} C_K}{n_{ПОСЛ2}}. \quad (8)$$

Если учесть, что $C_{КБ1} = C_{КБ2}$, то приравняв правые части (7) и (8), получим

$$n_{ПАР2} = \frac{n_{ПОСЛ2}}{n_{ПОСЛ1}} n_{ПАР1}. \quad (9)$$

В КБ1 и в КБ2 количество конденсаторов, включенных последовательно, может быть определено по формулам

$$n_{\text{ПОСЛ1}} = \frac{U_{\text{КБ1 MAX}}}{U_{\text{К MAX}}}, \quad (10)$$

$$n_{\text{ПОСЛ2}} = \frac{U_{\text{КБ2 MAX}}}{U_{\text{К MAX}}}. \quad (11)$$

Разделив (11) на (10), получим:

$$\frac{n_{\text{ПОСЛ2}}}{n_{\text{ПОСЛ1}}} = \frac{U_{\text{КБ2 MAX}}}{U_{\text{КБ1 MAX}}}, \quad (12)$$

$$n_{\text{ПОСЛ2}} = \frac{U_{\text{КБ2 MAX}}}{U_{\text{КБ1 MAX}}} \cdot n_{\text{ПОСЛ1}}. \quad (13)$$

После подстановки в выражение (9) правой части (12)

$$n_{\text{ПАР2}} = \frac{U_{\text{КБ2 MAX}}}{U_{\text{КБ1 MAX}}} \cdot n_{\text{ПАР1}}. \quad (14)$$

Перемножив уравнения (13) и (14) получим соотношение между количеством конденсаторов, входящих в состав КБ1 и КБ2

$$n_{\Sigma 2} = \frac{U_{\text{КБ2 MAX}}^2}{U_{\text{КБ1 MAX}}^2} \cdot n_{\Sigma 1}. \quad (15)$$

Таким образом, при неизменной ёмкости конденсаторной батареи количество одинаковых конденсаторов, входящих в её состав, возрастает пропорционально квадрату предельно-допустимого напряжения КБ. Аналогично будут увеличиваться масса, объем и стоимость КБ. Поэтому увеличение предельно-допустимого напряжения КБ при неизменной ёмкости не всегда является оправданным.

В связи с этим представляет интерес возможность уменьшения ёмкости КБ при одновременном увеличении предельно-допустимого напряжения до необходимого значения при неизменном количестве накапливаемой электрической энергии. Количество электрической энергии, которое накапливается в КБ при изменении напряжения на её клеммах от $U_{\text{КБ MIN}}$ до $U_{\text{КБ MAX}}$ [2],

$$\Delta A_{\text{КБ}} = \frac{C_{\text{КБ}} \cdot (U_{\text{КБ MAX}}^2 - U_{\text{КБ MIN}}^2)}{2}. \quad (16)$$

С учётом выражений (7), (8) и (10), (11) уравнение (16) можно переписать таким образом:

$$\Delta A_{\text{КБ}} = \frac{C_{\text{К}} \cdot n_{\text{ПАР}} \cdot (U_{\text{КБ MAX}}^2 - U_{\text{КБ MIN}}^2)}{2n_{\text{ПОСЛ}}},$$

$$\Delta A_{\text{КБ}} = \frac{C_{\text{К}} \cdot n_{\text{ПАР}} \cdot U_{\text{КБ MAX}}^2 \left(1 - \frac{U_{\text{КБ MIN}}^2}{U_{\text{КБ MAX}}^2}\right)}{2 \frac{U_{\text{КБ MAX}}}{U_{\text{К MAX}}}}. \quad (17)$$

Решая уравнение (17), получим

$$n_{\text{ПАР}} = \frac{2 \cdot \Delta A_{\text{КБ}}}{C_{\text{К}} \cdot U_{\text{КБ MAX}} \cdot U_{\text{К MAX}} \cdot \left(1 - \frac{U_{\text{КБ MIN}}^2}{U_{\text{КБ MAX}}^2}\right)}. \quad (18)$$

Умножим уравнение (17) на уравнение, аналогичное уравнению (10) или (11):

$$n_{\Sigma} = \frac{2 \cdot \Delta A_{\text{КБ}}}{C_{\text{К}} \cdot U_{\text{К MAX}}^2 \cdot \left(1 - \frac{U_{\text{КБ MIN}}^2}{U_{\text{КБ MAX}}^2}\right)}. \quad (19)$$

Из (19) следует, что количество конденсаторов, которые входят в состав КБ, пропорционально необходимому количеству запасаемой электрической энергии и обратно пропорционально ёмкости и квадрату предельного напряжения используемых конденсаторов. Кроме того, количество конденсаторов зависит от пределов изменения напряжения на клеммах КБ. В частности, если напряжение на клеммах КБ будет изменяться от $U_{\text{КБ MAX}}$ до нуля ($U_{\text{КБ MIN}}=0$), то количество конденсаторов, входящих в состав КБ, будет минимальным:

$$n_{\Sigma \text{ MIN}} = \frac{2 \cdot \Delta A_{\text{КБ}}}{C_{\text{К}} \cdot U_{\text{К MAX}}^2} = \frac{\Delta A_{\text{КБ}}}{A_{\text{К MAX}}}, \quad (20)$$

где $A_{\text{К MAX}}$ – максимальное количество электрической энергии, которое может быть накоплено в одном конденсаторе. Из (20) следует, что $n_{\Sigma \text{ MIN}}$ представляет собой количество конденсаторов, которое необходимо для накопления требуемого количества электрической энергии и используемых на 100%.

Разделив (19) на (20), получим зависимость относительного количества конденсаторов, входящих в состав КБ, от кратности изменения напряжения на клеммах КБ:

$$n_{\Sigma}^* = \frac{n_{\Sigma}}{n_{\Sigma \text{ MIN}}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{U_{\text{КБ MIN}}^2}{U_{\text{КБ MAX}}^2}\right)}. \quad (21)$$

График зависимости относительного количества конденсаторов, входящих в состав КБ от кратности изменения напряжения на клеммах КБ, приведен на рис.3.

Выражения (15) и (21) являются общими для КБ с регулированием напряжения в 1-й зоне, во 2-й зоне или в 2-х зонах сразу. В частности, из (21) следует, что при $U_{КБ\ MIN}/U_{КБ\ MAX}=0,2$ количество конденсаторов, входящих в состав КБ, превышает минимальное значение не более чем на 4%, а при $U_{КБ\ MIN}/U_{КБ\ MAX}=0,4$ – не более чем на 20%. Из [2] следует, что при $U_{КБ\ MIN}/U_{КБ\ MAX}=0,2$ коэффициент использования энергии КБ равен 96%, а при $U_{КБ\ MIN}/U_{КБ\ MAX}=0,4$ этот коэффициент равен 84%. Так как для практических схем ПР-КБ значение $U_{КБ\ MIN}/U_{КБ\ MAX}$ не может быть очень малым, то при проектировании БИП можно рекомендовать выбирать значение $U_{КБ\ MIN}/U_{КБ\ MAX}$ для каждой зоны регулирования напряжения по условию:

$$0,2 \leq \frac{U_{КБ\ MIN}}{U_{КБ\ MAX}} \leq 0,4.$$

Следовательно, выбор параметров КБ независимо от зоны регулирования напряжения необходимо проводить в следующей последовательности:

- по значению параметров конденсаторов, соединяемых в КБ: на основании требований к количеству электрической энергии, запасаемой в КБ: по выражению (20) необходимо определить минимально-возможное требуемое количество одинаковых конденсаторов ($n_{\Sigma\ MIN}$) для создания КБ;
- задаваясь диапазоном изменения напряжения на клеммах КБ $U_{КБ\ MIN}/U_{КБ\ MAX}=0,2 \div 0,4$ (что соответствует значению коэффициента использования энергии конденсаторов от 96% до 84%), по формуле (21) необходимо определить требуемое количество конденсаторов (n_{Σ}), входящих в состав КБ;
- задаваясь значением $U_{КБ\ MIN}$ (или $U_{КБ\ MAX}$), необходимо определить значение $U_{КБ\ MAX}$ (или $U_{КБ\ MIN}$);
- на основании значений параметров используемых конденсаторов и выражений (10) или (11) необходимо определить требуемое количество одинаковых конденсаторов, входящих в состав КБ и включенных последовательно ($n_{ПОСЛ}$);
- на основании значений n_{Σ} и $n_{ПОСЛ}$ необходимо определить требуемое количество параллельных цепей конденсаторов $n_{ПАР}$, входящих в состав КБ.

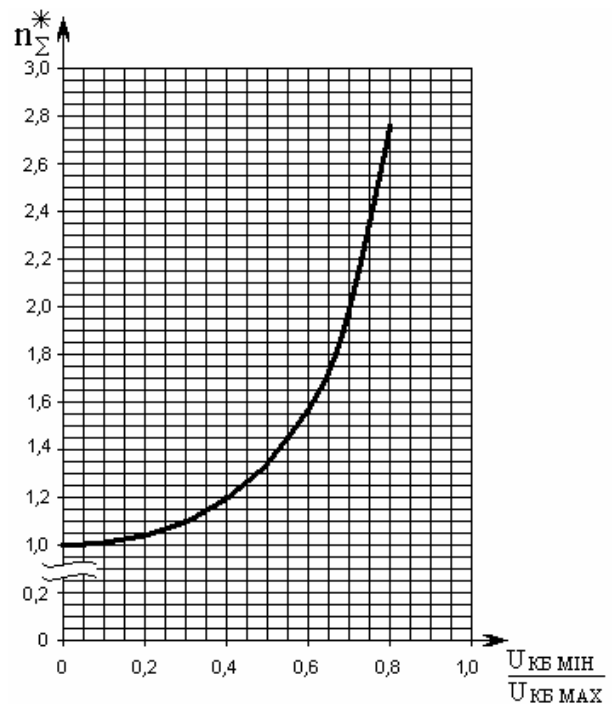


Рис.3. График зависимости относительного количества конденсаторов, входящих в состав КБ от кратности изменения напряжения на клеммах КБ

Для оценки требуемого значения ёмкости КБ с регулированием напряжения в 1-й или во 2-й зонах рассмотрим случай торможения ЭТС массой $m=4700\text{кг}$ с максимальной скоростью $V_{MAX}=22,22\text{м/с}$ (80км/час) до полной остановки. Максимальное значение кинетической энергии ЭТС определяется выражением

$$A_K = \frac{mV_{MAX}^2}{2},$$

т.е. $A_K = \frac{4700 \cdot 22,22^2}{2} = 1,16 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$

Предположим, что вся энергия, генерируемая МК при торможении ЭТС, поступает только в КБ и не используется для заряда АБ. Сначала рассмотрим КБ, предназначенную для регулирования напряжения только в 1-ой зоне. Если принять $U_{КБ\ MAX}=U_{АБ}$, а $U_{КБ\ MIN}=0,4U_{АБ}$, то требуемое значение ёмкости КБ, необходимое для накопления всей электрической энергии, генерируемой ЭТС при торможении, может быть определено по формуле, приведенной в [2]:

$$C_{КБ} = \frac{2 \cdot \Delta A_{КБ}}{U_{АБ}^2 - (0,4U_{АБ})^2}. \quad (22)$$

С учётом выражения (3) получим:

$$C_{\text{КБ}} \approx \frac{1,5 \cdot A_{\text{К}}}{0,84 \cdot U_{\text{АБ}}^2}. \quad (23)$$

Из (23) следует, что для полной рекуперации кинетической энергии ЭТС $A_{\text{К}}=1,160 \times 10^6$ Дж необходимо иметь конденсаторную батарею ёмкостью 16,91 Ф, которая, в соответствии с (3), должна накапливать и отдавать $\Delta A_{\text{КБ}}=0,870 \times 10^6$ Дж электрической энергии. При этом преобразователь ПР-КБ должен изменять напряжение на КБ на 210 В (или на $0,6 U_{\text{АБ}}$). Если для создания КБ использовать конденсаторы ёмкостью $C_{\text{К}}=10$ Ф с максимальным напряжением $U_{\text{К МАХ}}=100$ В, то при регулировании напряжения только в 1-ой зоне потребуется $4 \times 7=28$ конденсаторов и получится КБ ёмкостью 17,50 Ф с максимальным напряжением 400В. При работе ПР-КБ в 1-й зоне напряжение на КБ не может превысить $U_{\text{АБ}}=350$ В, поэтому КБ будет использоваться по напряжению на 87,5 %. Поскольку минимальное напряжение на КБ равно 140 В, то в соответствии с формулой (16) эта КБ может накапливать и отдавать $\Delta A_{\text{КБ}}=0,900 \times 10^6$ Дж электрической энергии, что на 3 % превышает требуемое значение.

Для сравнения, определим требуемое максимальное значение напряжения на КБ, работающей во 2-ой зоне ($U_{\text{КБ МАХ}} > U_{\text{АБ}}$, $U_{\text{КБ МИН}}=U_{\text{АБ}}$), ёмкость которой также равна 16,91 Ф, при рекуперации такого же количества кинетической энергии ($A_{\text{К}}=1,16 \times 10^6$ Дж):

$$U_{\text{КБ МАХ}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta A_{\text{КБ}}}{C_{\text{КБ}}} + U_{\text{АБ}}^2} = \sqrt{\frac{1,5 \cdot A_{\text{К}}}{C_{\text{КБ}}} + U_{\text{АБ}}^2},$$

$$U_{\text{КБ МАХ}} = \sqrt{\frac{1,5 \cdot 1,16 \cdot 10^6}{16,91} + 350^2} = 474,8 \text{ В}.$$

Таким образом, напряжение на КБ должно измениться на 124,8В (или на $0,36 U_{\text{АБ}}$). Следовательно, при накоплении в КБ одинаковой ёмкости равного количества электрической энергии от ПР-КБ, работающего во 2-ой зоне, требуется меньшая кратность регулирования напряжения на КБ, чем от ПР-КБ, работающего в 1-й зоне.

При этом необходимо помнить, что в соответствии с (15) при неизменной ёмкости КБ увеличение максимального напряжения

КБ в 1,36 раза требует увеличения в $(1,36)^2=1,85$ раза количества конденсаторов, входящих в состав КБ. Если для создания КБ с регулированием напряжения только во 2-ой зоне ($U_{\text{КБ МАХ}}=474,8\text{В}$) использовать такие же конденсаторы ёмкостью $C_{\text{К}}=10\text{Ф}$ с максимальным напряжением $U_{\text{К МАХ}}=100\text{В}$, то потребуется $5 \times 8=40$ таких конденсаторов. При этом получится КБ ёмкостью 16,00Ф с максимальным напряжением 500В и с минимальным напряжением 350В. Если использовать КБ по напряжению на 100%, то в соответствии с формулой (16) эта КБ может накапливать и отдавать $\Delta A_{\text{КБ}}=1,020 \times 10^6$ Дж электрической энергии, что на 17% превышает требуемое значение.

Рассчитаем параметры КБ уменьшенной ёмкости при одновременном увеличении предельно-допустимого напряжения до необходимого значения с учётом неизменного количества накапливаемой электрической энергии. В соответствии с формулой (21) и изложенной методикой определим параметры КБ, которая предназначена для регулирования напряжения во 2-й зоне. Для этого используем условие $U_{\text{КБ МИН}}/U_{\text{КБ МАХ}}=0,4$. Принимаем $U_{\text{КБ МИН}}=U_{\text{АБ}}=350\text{В}$. Следовательно, $U_{\text{КБ МАХ}}=U_{\text{КБ МИН}}/0,4=350/0,4=875\text{В}$. На основании выражения (20) определяем минимально-возможное количество конденсаторов в составе КБ $n_{\Sigma \text{ МИН}}=17,4$. По формуле (21) определяем $n_{\Sigma}=20,7$ – требуемое количество конденсаторов, входящих в состав КБ при коэффициенте использования их энергии на 84%.

На основании выражения (10) или (11) определяем $n_{\text{ПОСЛ}} \approx 9$ – требуемое количество конденсаторов, включенных последовательно, а затем и требуемое количество параллельных цепей конденсаторов:

$$n_{\text{ПАР}} = \frac{n_{\Sigma}}{n_{\text{ПОСЛ}}},$$

$$n_{\text{ПАР}} = \frac{20,7}{9} = 2,3 \text{ шт.}$$

Принимаем $n_{\text{ПАР}}=3$. В результате $n_{\Sigma}=27$, что на 13 конденсаторов меньше, чем для предыдущего случая регулирования напряжения во 2-ой зоне и на 1 конденсатор меньше, чем для случая регулирования напряжения в 1-ой зоне. При этом ёмкость КБ равна 3,33Ф при $U_{\text{КБ МАХ}}=900\text{В}$ и $U_{\text{КБ МИН}}=350\text{В}$. Если ис-

пользовать КБ по напряжению на 100%, то согласно формуле (16) в этой КБ может быть накоплено $\Delta A_{КБ}=1,145 \times 10^6$ Дж электрической энергии, что на 32% превышает требуемое значение. При этом коэффициент использования конденсаторов, входящих в состав КБ

$$\frac{n_{\Sigma \text{MIN}}}{n_{\Sigma}} = \frac{17,4}{27} = 0,644.$$

Рассмотрим, насколько эффективно использование 2-зонного регулирования напряжения на КБ. Для этого определим параметры КБ, предназначенной для регулирования напряжения в 1-й и во 2-й зонах от $U_{КБ \text{ MIN}}=140$ В до $U_{КБ \text{ MAX}}=900$ В. В этом случае $U_{КБ \text{ MIN}}/U_{КБ \text{ MAX}}=140/900=0,156$. В соответствии с изложенной методикой определяем требуемое количество конденсаторов, входящих в состав КБ и уточняем значение максимального напряжения и ёмкости КБ, а также количество электрической энергии, которое может быть накоплено в КБ. Результаты расчётов параметров КБ при использовании разных вариантов ПР-КБ приведены в табл.1.

Вывод. При проектировании КБ автономного источника питания необходимо, прежде всего, учитывать технические возможности ПР-КБ по реализации диапазона регулирования напряжения ($U_{КБ \text{ MAX}}/U_{КБ \text{ MIN}}$). Увеличение диапазона регулирования напряжения приводит к более полному использованию энергии каждого конденсатора, входящего в состав КБ, и, следовательно, к уменьшению их количества. Вследствие этого снижаются масса, объём и стоимость КБ. Поскольку использование 2-х зонного ПР-КБ создаёт предпосылки для расширения диапазона регулирования напряжения на КБ, то 3-й вариант ПР-КБ оказывается наиболее предпочтительным.

1.

Параметры	Зона регулирования напряжения на КБ			
	1-я	2-я	2-я	1-я и 2-я
$U_{КБ \text{ MIN}}, \text{ В}$	140	350	350	140
$U_{КБ \text{ MAX}}, \text{ В}$	350	500	900	900
$U_{КБ \text{ MIN}}/U_{КБ \text{ MAX}}$	0,400	0,700	0,389	0,156
$C_{КБ}, \text{ Ф}$	17,50	16,00	3,33	2,22
Кол-во конденсаторов $C_{К}=10\text{Ф}$, $U_{К}=100\text{В}$.	28	40	27	18
$\Delta A_{КБ}, 10^6 \text{ Дж}$	0,900	1,020	1,145	0,877
$n_{\Sigma \text{ MIN}}/n_{\Sigma}$	0,621	0,435	0,644	0,967

Список использованной литературы:

1. Вершинин Д.В. Визначення параметрів основних вузлів електричної схеми електробуса / Вершинин Д.В., Войтенко В.А., Смотров Е.А. // Електромашинобуд. та електрообладн. – К.: Техніка. – 2009. – Вип. 74. – С. 10–17.
2. Вершинин Д.В.. Особенности выбора параметров бортового источника питания электротранспортного средства / Д.В. Вершинин, В.А. Водичев, В.А. Войтенко, Е.А. Смотров // Електромашинобуд. та електрообладн. – К.: Техніка. – 2008. – Вип. 71. – С. 5–11.

Получено 30.08.2010



Войтенко
Владимир Андреевич,
канд.техн.наук, доцент каф.
эл. механ. систем с компьютерным управлением
Одеск. нац. политехн. ун-та
тел. 048-7-797-497

1. Результаты расчётов параметров КБ