

# ДИНАМИЧЕСКАЯ КОММУТАЦИЯ ИОНИСТОРОВ В ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**МАТВЕЕВ Андрис Илмарович**, *Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева*

**АНДРЕЕВ Сергей Андреевич**, *Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева*

*В статье описаны режимы динамической коммутации ионисторов, позволяющие исключить оба названных недостатка. Тепловые потери исключаются заменой параметрического стабилизатора на электронное устройство, подающее электрическую энергию в импульсном режиме. При этом среднее значение напряжения на питаемом техническом средстве можно варьировать в широком диапазоне. Для использования энергии, остающейся в ионисторе при напряжении, меньшем напряжения питания потребителя, предлагается изменять схемы взаимного соединения ионисторов в группе.*

**Введение.** Возрастающая роль в автоматизации и роботизации технологических процессов в АПК принадлежит разветвленным телеметрическим системам. Для питания параметрических датчиков, устройств первичной обработки и передачи информации, а также других элементов беспроводных телеметрических систем целесообразно использовать подзаряжаемые автономные источники энергии. На сегодняшний день в качестве таких источников наибольшее распространение получили химические аккумуляторы. При небольших потребляемых мощностях миниатюрные аккумуляторы способны обеспечивать потребителей достаточно качественной энергией в течение нескольких месяцев или нескольких лет. Однако даже при незначительном нарушении баланса между энергетическими требованиями нагрузки и емкостью аккумулятора последние либо не справляются со своими задачами и требуют частой подзарядки, либо выходят из строя значительно раньше установленного срока. Частично перечисленные недостатки преодолеваются периодической подзарядкой аккумуляторов от автономных источников: фотоэлектрических преобразователей, термоэлектрических модулей и т.д. Вместе с тем, допуская в процесс накопления энергии химическую составляющую, мы неизбежно его усложняем, повышаем степень неопределенности в достижении цели, способствуем снижению КПД. Кроме того, общими недостатком химических накопителей энергии является сильная зависимость их характеристик от температуры. Наконец, экс-

плуатация аккумуляторов не всегда отвечает экологическим требованиям, а их утилизация с годами становится ощутимой проблемой.

Альтернативой химическим накопителям электрической энергии могут стать конденсаторы сверхвысокой емкости (ионисторы), при работе которых не происходят какие-либо химические реакции, а сами ионисторы сохраняют свои эксплуатационные свойства и после 10000 зарядно-разрядных циклов [5, 9]. Низкая плотность энергии ионисторов компенсируется возможностью использования накопленной энергии практически в любых режимах, а также высокой экологичностью при их эксплуатации и утилизации.

Существенным фактором, сдерживающим широкое применение ионисторов в качестве накопителей энергии, является сильная зависимость напряжения на их обкладках от степени заряда [2]. Большинство современных электронных устройств весьма требовательны к уровню питающего напряжения и в редких случаях допускают его отклонение от номинала на величину более 5–10 % [4, 7]. Традиционно для обеспечения постоянства напряжения питания используют электронные стабилизаторы. Однако в нашем случае, при работе в условиях явного дефицита располагаемой энергии электронные преобразователи малопригодны. Это объясняется тем, что в параметрических стабилизаторах избыточно повышенное напряжение гасится на автоматически меняющемся сопротивлении. Такое сопротивление реализуется либо самим стабилизатором, либо управляемым





им триодом (триодами), включенным последовательно с нагрузкой. При использовании параметрической стабилизации часть запасенной энергии преобразуется в тепловую форму, что снижает эффективность процесса и одновременно приводит к увеличению габаритных размеров устройства из-за дополнительных теплоотводящих конструкций. В то же время при напряжении на обкладках ионистора  $U$ , меньшим напряжения, допустимого для питания потребителей  $U_{\min}$ , часть энергии вообще не используется.

С появлением чрезвычайно дешевых микросхем, выполняющих измерительные, логические и коммутационные операции, появилась возможность решения обозначенной проблемы иным образом. Это решение сводится к использованию в качестве накопителей энергии нескольких ионисторов, которые коммутируются в различные схемы соединения в процессе заряда или разряда [1]. По существу, это решение является новым воплощением принципа динамической коммутации, при реализации которого эффективность использования автономно полученной энергии заметно возрастает.

Целью настоящей работы является обоснование способа динамической коммутации ионисторов при их использовании в качестве накопителей энергии в источниках питания элементов телеметрических систем.

**Материалы исследований.** В качестве материала исследований были использованы промышленные ионисторы, активные сопротивления, имитирующие цепь разряда, и магнитоэлектрические измерительные приборы. Теоретические исследования базировались на сведениях из теории переходных процессов и методах расчета электрических цепей.

**Результаты исследований.** Рассмотрим существо и возможность исключения параметрической стабилизации на примере цепи разряда ионистора, представляющей собой последовательно соединенные сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}}$  и эквивалентное сопротивление стабилитрона  $R_{\text{г}}$ . Энергетический баланс в цепи разряда конденсатора в предшествующих исследованиях был определен следующим образом [6]:

полная энергия, запасенная заряженным ионистором,  $W = \frac{CU_{\max}^2}{2}$ .

энергия, отданная ионистором при его раз-

ряде,  $W_{\text{отд}} = \frac{C(U_{\max}^2 - U_{\min}^2)}{2}$ .

энергия, полезно используемая нагрузкой,

$$W_{\text{н}} = U_{\min} C(U_{\max} - U_{\min}).$$

энергия, теряемая на стабилитроне,

$$W_{\text{г}} = \frac{C(U_{\max} - U_{\min})^2}{2}.$$

неиспользованная энергия  $W_{\text{ост}} = \frac{CU_{\min}^2}{2}$ .

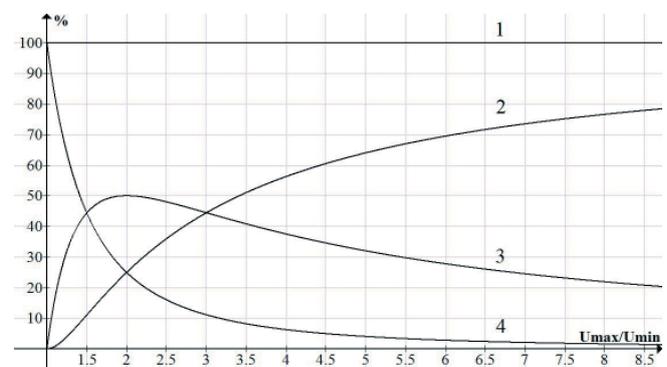
В приведенных выражениях  $C$  – емкость ионистора,  $\Phi$ ;  $U_{\max}$  – максимальное напряжение, до которого заряжается ионистор,  $V$ ;  $U_{\min}$  – минимально допустимое напряжение на нагрузке,  $V$ .

На рис. 1 представлены кривые зависимостей долей рассматриваемых энергий от

отношения  $U_{\max}/U_{\min}$ . При этом кривая 1 иллюстрирует изменение  $W_{\text{г}}$ , кривая 2 – изменение  $W_{\text{н}}$ , кривая 3 – изменение  $W_{\text{отд}}$ , кривая 4 – значение  $W$ .

Из рис. 1 видно, что при параметрической стабилизации возможно рациональное использование не более 50 % запасенной энергии при двукратном превышении максимального напряжения над минимальным. Для уменьшения объема неиспользуемой энергии возможно применение группы ионисторов, суммарная емкость которых соответствует требуемому значению. В различные моменты времени в цепь разряда должны подключаться отдельные ионисторы группы, при этом коммутацию ионисторов следует производить не в функции времени, а в функции напряжений на их обкладках.

Проанализируем разряд на активную нагрузку группы из ряда (от одного до десяти)



**Рис. 1. Кривые зависимостей долей энергетического баланса от отношения максимального напряжения на обкладках конденсатора к минимально допустимому напряжению на нагрузке**

ионисторов, принимая во внимание, что в момент заряда они были соединены параллельно, а в процессе разряда – последовательно.

В качестве примера используем следующие параметры схем:  $U_{\max} = 10$  В,  $U_{\min} = 7$  В,  $C = 1$  Ф (опыт 1),

$U_{\max} = 10$  В,  $U_{\min} = 5$  В,  $C = 1$  Ф (опыт 2) и

$U_{\max} = 10$  В,  $U_{\min} = 3$  В,  $C = 1$  Ф (опыт 3).

Результаты расчета представим в виде графика (рис. 2), отражающего зависимость доли неиспользованной энергии  $W_{\text{ост}}$ , %, от количества  $n$  ионисторов в группе.

Из графика (см. рис. 2) видно, что при разряде двух ионисторов для условий опыта 2 доля неиспользованной энергии снижается с 25 до 12,5 %. В дальнейшем с увеличением количества ионисторов доля неиспользованной энергии быстро уменьшается и при  $n > 5$  оказывается меньше 1 %.

Легко заметить, что при  $n \geq 3$  появляется возможность коммутировать ионисторы в различные схемы, не ограничиваясь простыми параллельным и последовательным соединениями (рис. 3). Очевидно, что в начале разряда ионисторы их следует соединять параллельно (см. рис. 3, а), по мере снижения напряжения – переходить к комбинированному соединению (см. рис. 3, б) и в завершающей стадии разряда – соединить последовательно (см. рис. 3, в). Такая динамическая коммутация позволяет поддерживать напряжение на нагрузке относительно постоянным (или, по крайней мере, изменяющимся в небольшом интервале), использовать гораздо большую долю накопленной энергии и избежать тепловых потерь на стабилитроне.

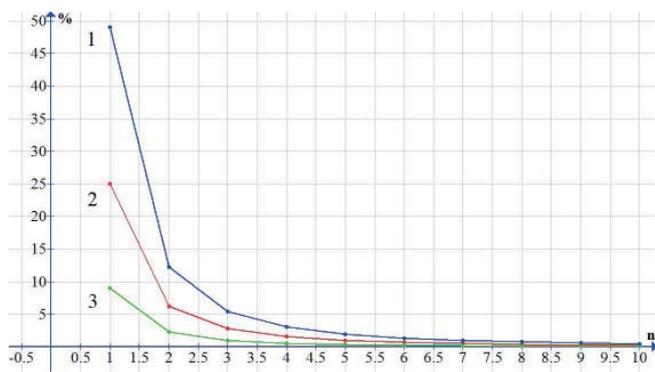


Рис. 2. Зависимость доли неиспользованной энергии  $W_{\text{ост}}$ , %, от количества ионисторов в группе

Следует отметить, что не все возможные схемы соединения ионисторов можно признать эффективными. Например, неэффективной следует признать схему, в которой последовательно соединенные ионисторы шунтируются другими ионисторами. В таком случае в группе начнет протекать уравнительный ток, который будет иметь место до полного выравнивания напряжений на всех параллельно включенных фрагментах схем. При низком внутреннем сопротивлении коммутирующих устройств уравнительные токи могут многократно превышать рабочие токи потребителя. Во избежание появления уравнительных токов в динамической коммутации должны участвовать  $2^m$  ионисторов, где  $m$  – целое положительное число. При этом допускается только симметричное изменение исходной схемы вплоть до полного выстраивания ионисторов в параллельную или последовательную цепь.

Оценку составляющих компонентов энергетического баланса при использовании динамической коммутации ионисторов и наличии стабилитрона можно произвести в соответствии со следующими выражениями:

$$W = \frac{CU_{\max}^2}{2}; \quad W_{\text{ост}}(n) = \frac{U_{\min}^2 C}{2 \cdot 2^{2^m}}$$

При соблюдении условия  $U_{\max} = 2U_{\min}$

$$W_{\text{ост}}(n) = \sum_{i=0}^n \frac{U_{\min}^2 C}{2^{2^i}}$$

где  $i$  – порядковый номер коммутации.

При отсутствии стабилитрона

$$W_{\text{ост}} = \frac{CU_{\max}^2}{2} - \frac{CU_{\min}^2}{2 \cdot 2^{2^m}} = \frac{C \cdot 2^{2^m} U_{\max}^2 - CU_{\min}^2}{2 \cdot 2^{2^m}} = \frac{C(2^{2^m} U_{\max}^2 - U_{\min}^2)}{2 \cdot 2^{2^m}}$$

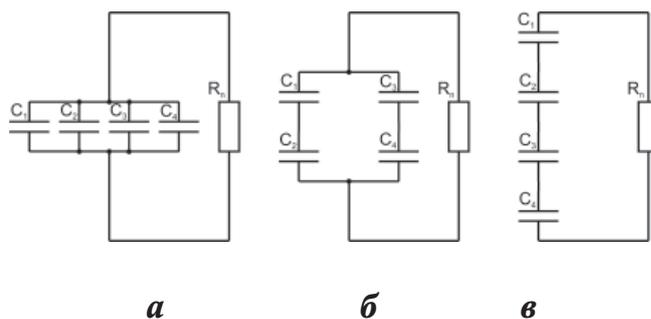


Рис. 3. Схемы соединения ионисторов при их динамической коммутации в процессе разряда на активную нагрузку  $R_{\text{н}}$



$$W_{\text{отд}} = \frac{CU_{\text{max}}^2}{2} - \frac{CU_{\text{min}}^2}{2 \cdot 2^m} = ;$$

$$= \frac{C \cdot 2^m U_{\text{max}}^2 - CU_{\text{min}}^2}{2 \cdot 2^m} = \frac{C(2^m U_{\text{max}}^2 - U_{\text{min}}^2)}{2 \cdot 2^m}.$$

Результаты расчета компонентов энергетического баланса в процентном выражении от полной накопленной энергии при различном количестве ионисторов в группе сведены в таблицу.

Легко заметить, что при использовании группы из восьми ионисторов доля неиспользованной энергии становится менее 1 %.

Динамическая коммутация ионисторов в реальных блоках питания должна производиться бесконтактными полупроводниковыми ключевыми устройствами. При этом длительность подключения ионисторов будет определяться величиной напряжения на их обкладках.

В качестве эффективного способа уменьшения напряжения на нагрузке при отсутствии стабилитрона можно рекомендовать реализацию отбора накопленной энергии в импульсном режиме. Чередуя открытое и закрытое состояние коммутирующего устройства, возможно поддержание среднего значения выходного напряжения на заданном уровне. При этом среднее значение напряжения в открытом состоянии коммутирующего устройства и время закрытого состояния по мере разряда ионистора уменьшаются.

Известно, что при подключении ионистора к нагрузке напряжение на нем подчиняется закону

$$u = u_0 e^{-\frac{t}{RC}},$$

где  $u_0$  – напряжение на обкладках ионистора в момент подключения к нагрузке,  $t$  – продолжительность разряда, с;  $U$ ;  $R$  – сопротивление питаемого устройства, Ом;  $C$  – емкость ионистора, Ф [3].

Обозначим продолжительность откры-

**Доли компонентов энергетического баланса в процентном выражении от полной накопленной энергии при различном количестве ионисторов в группе**

Количество ионисторов в группе $m$	1	2	4	8
Доля отданной энергии $W_{\text{отд}}$ , %	75	93,8	98,4	99,6
Доля неиспользованной энергии $W - W_{\text{отд}}$ , %	25	6,3	1,6	0,4

того состояния коммутирующего устройства символом  $T_1$ , а закрытого –  $T_2$ . При использовании ионистора в качестве накопителя энергии  $T_1 = \text{const}$ , а  $T_2$  будет зависеть от среднего напряжения  $U_{\text{ср}}$  на обкладках ионистора в открытом состоянии коммутирующего устройства и рабочего напряжения  $U_{\text{ном}}$  питаемого устройства  $U_{\text{ном}}$ . Величину среднего значения напряжения можно найти в соответствии с выражением:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} u e^{-\frac{t}{RC}} dt = \frac{CRu - CRu e^{-\frac{T_1}{RC}}}{T_1} = \frac{CRu \left(1 - e^{-\frac{T_1}{RC}}\right)}{T_1}.$$

В последнем выражении значение  $u$  соответствует величине напряжения на обкладках ионистора в начале каждого интервала времени  $T_1$ .

Тогда  $T_2$  может быть найдено по формуле

$$T_2 = T_1 \left( \frac{U_{\text{ср}}}{U_{\text{ном}}} - 1 \right).$$

В качестве примера рассмотрим разряд группы из двух ионисторов. Примем:  $C = 2,5 \text{ Ф}$  (каждого ионистора),  $R_{\text{нагр}} = 500 \text{ Ом}$ ,  $U_{\text{max}} = 10 \text{ В}$ ,  $U_{\text{нагр}} = 5 \text{ В}$ .

При использовании стабилитрона разряд ионисторов происходит по следующему закону [8, 10]:

$$U = U_{\text{max}} e^{-\frac{t}{R_q(U) + R_n} C},$$

где  $R_q(U)$  – сопротивление стабилитрона, которое зависит от текущего напряжения,

$$R_q = \frac{U_{\text{нагр}} R_{\text{нагр}}}{u}.$$

Разряд ионисторов до номинального напряжения питания нагрузки происходит за 1250 с (кривые 1, рис. 4). Следует принять во внимание, что при построении кривой было сделано допущение об изменении внутреннего сопротивления стабилитрона через каждые 100 с. При использовании динамической коммутации ионисторов скорость разряда уменьшается и длительность процесса приближается к 2500 с (кривые 2, рис. 4). После переключения ионисторов от параллельной схемы соединения в последовательную напряжение на нагрузке возрастает и условия питания сохраняются. На графике (см. рис. 4) момент переключения ионисто-

ров обозначен вертикальным пунктирным отрезком прямой линии.

На рис. 5, а представлена схема группы ионисторов, оснащенная ключами  $K1$ ,  $K2$ , и  $K4$ . При этом ключи  $K1$ ,  $K2$  и  $K3$  предназначены для изменения схем взаимного включения ионисторов, а ключ  $K4$  – для регулирования напряжения на нагрузке.

На начальном этапе разряда ключи  $K1$  и  $K3$  находятся в замкнутом состоянии (см. рис. 5, б), а ключ  $K2$  – в разомкнутом. В этом случае ионисторы  $C1$  и  $C2$  оказываются соединенными параллельно. По мере разряда ионисторов ключи  $K1$  и  $K3$  переводятся в разомкнутое состояние, а ключ  $K2$  – в замкнутое. В результате ионисторы  $C1$  и  $C2$  соединяются последовательно, что определяет увеличение напряжения на нагрузке. При периодическом замыкании и размыкании ключа  $K4$  происходит регулируемое снижение напряжения. В результате расчетов было установлено, что продолжительность работы нагрузки от группы ионисторов за счет коммутации ключей  $K1$ ,  $K2$  и  $K3$  увеличивается на 600 с, за счет ключа  $K4$ , – на 1850 с.

**Заключение.** При двухкратной разности максимального и номинального напряжения на нагрузке достигается наибольшая эффективность использования энергии ионисторов.

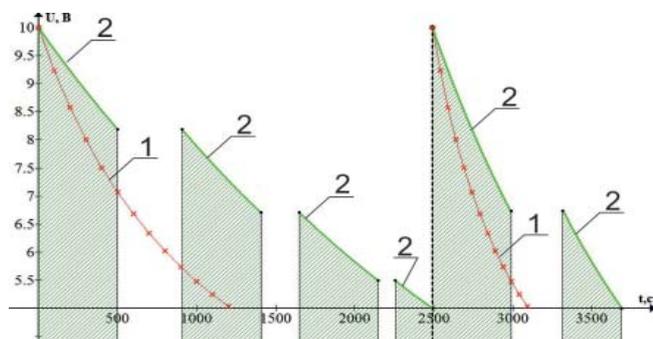


Рис. 4. Кривые изменения напряжения питания при различных режимах разряда ионисторов

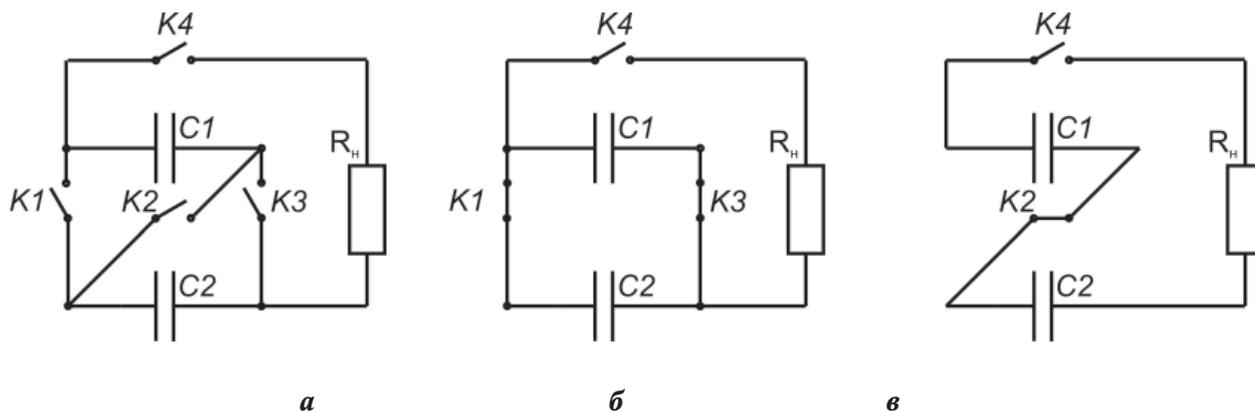


Рис. 5. Схема группы коммутируемых ионисторов

Динамическая коммутация ионисторов, заключающаяся в изменении схем их взаимного соединения позволяет использовать запасенную энергию. Использование динамической коммутации ионисторов при их подключении к нагрузке в управляемом импульсном режиме позволяет увеличить продолжительность работы потребителя в три раза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С.А., Судник Ю.А., Матвеев А.И. Устройство для измерения расхода жидкости Патент № 2627546 Российская Федерация МПК G01F 1/06 (2006.01): заявитель и патентообладатель Андреев Сергей Андреевич. – 2016119238; заявл. 18.05.2016; опубл. 18.08.2017. Бюл. № 22.

2. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учеб. пособие, 7-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с.

3. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. Основы теории цепей: учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

4. Ефимов И.П. Источники питания РЭА: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 136 с.

5. Кузнецов В.П., Компан М.Е., Кравчик А.Е. Двойнослойные конденсаторы (ионисторы) на основе нанопористых углеродных материалов – перспективные накопители электроэнергии // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – № 2. – С. 106–109.

6. Матвеев А.И., Андреев С.А. Исследование энергетических показателей процесса разряда конденсаторов на переменную нагрузку // Международный технико-экономический журнал. – 2018. – № 3. – С. 85–92.

7. Нейвельт Г.С., Мазель К.Б., Хусаинов Ч.И. Источники питания радиоэлектронной аппаратуры: справочник. – М.: Радио и связь, 1986. – 576 с.

8. Сажнев А.М., Рогулина Л.Г., Абрамов С.С. Электропитание устройств и систем связи: учеб. пособие. – Новосибирск, 2008. – 112 с.

9. Сташинов Ю.П., Савченко В.А. Электропривод шахтного аккумуляторного электровоза

с электрохимическим конденсатором в качестве накопителя энергии рекуперации // Перспективы развития Восточного Донбасса: материалы VI Междунар. и 64-й Всерос. науч.-практ. конф. – Новочеркасск, 2015. – С. 149–153.

10. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций: учеб. пособие для вузов / В.М. Бушуев [и др.]. – М., 2009. – 384 с.

**Матвеев Андрис Илмарович**, аспирант кафедры «Автоматизация и роботизация технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина», Российский государственный аграрный университет-

МСХА имени К.А. Тимирязева. Россия.

**Андреев Сергей Андреевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация и роботизация технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина», Российский государственный аграрный университет-МСХА имени К.А. Тимирязева. Россия.

127550, г. Москва, Тимирязевская улица, 49.  
Тел.: (499) 977-1455.

**Ключевые слова:** накопители электрической энергии; ионисторы; параметрический стабилизатор напряжения; энергетический баланс; динамическая коммутация.

## DYNAMIC COMMUNICATION OF IONISTORS IN POWER SOURCES OF ELEMENTS OF TELEMETRIC SYSTEMS

**Matveev Andris Ilmarovich**, Post-graduate Student of the chair "Automatization and Robotization of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin", Russian Agrarian University, Moscow Agricultural academy named after K.A. Timiryazev. Russia.

**Andreev Sergey Andreevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Automatization and Robotization of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin", Russian Agrarian University, Moscow Agricultural academy named after K.A. Timiryazev. Russia.

**Keywords:** accumulators of electric energy; ionistors;

parametric voltage regulator; energy balance; dynamic commutation.

*The article describes the modes of dynamic switching of ionistors, which allow to eliminate both mentioned shortcomings. Thermal losses are eliminated by replacing the parametric stabilizer with an electronic device that supplies electrical energy in a pulsed mode. In this case, the average value of the voltage on the supplied technical means can be varied in a wide range. To use the energy remaining in the ionistor at a voltage lower than the consumer's supply voltage, it is proposed to change the interconnection schemes of ionistors in the group.*

УДК 677.027

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЛЬНА МАСЛИЧНОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ИННОВАЦИОННОГО АГРЕГАТА КВЛ-1М И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ВОЛОКНА

**СОБОЛЕВА Елена Валерьевна**, Федеральный научный центр лубяных культур

**НОВИКОВ Эдуард Валерьевич**, Федеральный научный центр лубяных культур

**БЕЗБАБЧЕНКО Александр Владиславович**, Федеральный научный центр лубяных культур

**ПРОКОФЬЕВ Сергей Владимирович**, Федеральный научный центр лубяных культур

**ВНУКОВ Владимир Геннадьевич**, Федеральный научный центр лубяных культур

*Представлены результаты экспериментальных и статистических исследований первичной переработки льна масличного в полевых условиях после инновационного мобильного агрегата КВЛ-1М, различных технологических схем доочистки кострволокнистой массы в заводских условиях; определены качественные показатели полученного волокна.*

**Введение.** Для обеспечения импортозамещения особенно важно ускоренное развитие национального сельскохозяйственного производства [3], которое невозможно без работы предприятий на селе, новых технологий и инновационного, эффективного оборудова-

ния отечественного производства [4]. Такие технологии и инновационные агрегаты появились и в льноперерабатывающей отрасли, в частности, для переработки масличного льна в волокно после получения из него семян.

