



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H01M 10/42 (2019.08); G01R 31/36 (2019.08); H02J 7/00 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2019128561, 12.09.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.09.2019Дата регистрации:
20.02.2020

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
14.09.2018 JP 2018-172614;
06.08.2019 JP 2019-144603

(45) Опубликовано: 20.02.2020 Бюл. № 5

Адрес для переписки:

129090, Москва, ул. Б. Спасская, 25, стр. 3, ООО
"Юридическая фирма Городисский и
Партнеры"

(72) Автор(ы):

ТАКАХАСИ, Кендзи (JP)

(73) Патентообладатель(и):

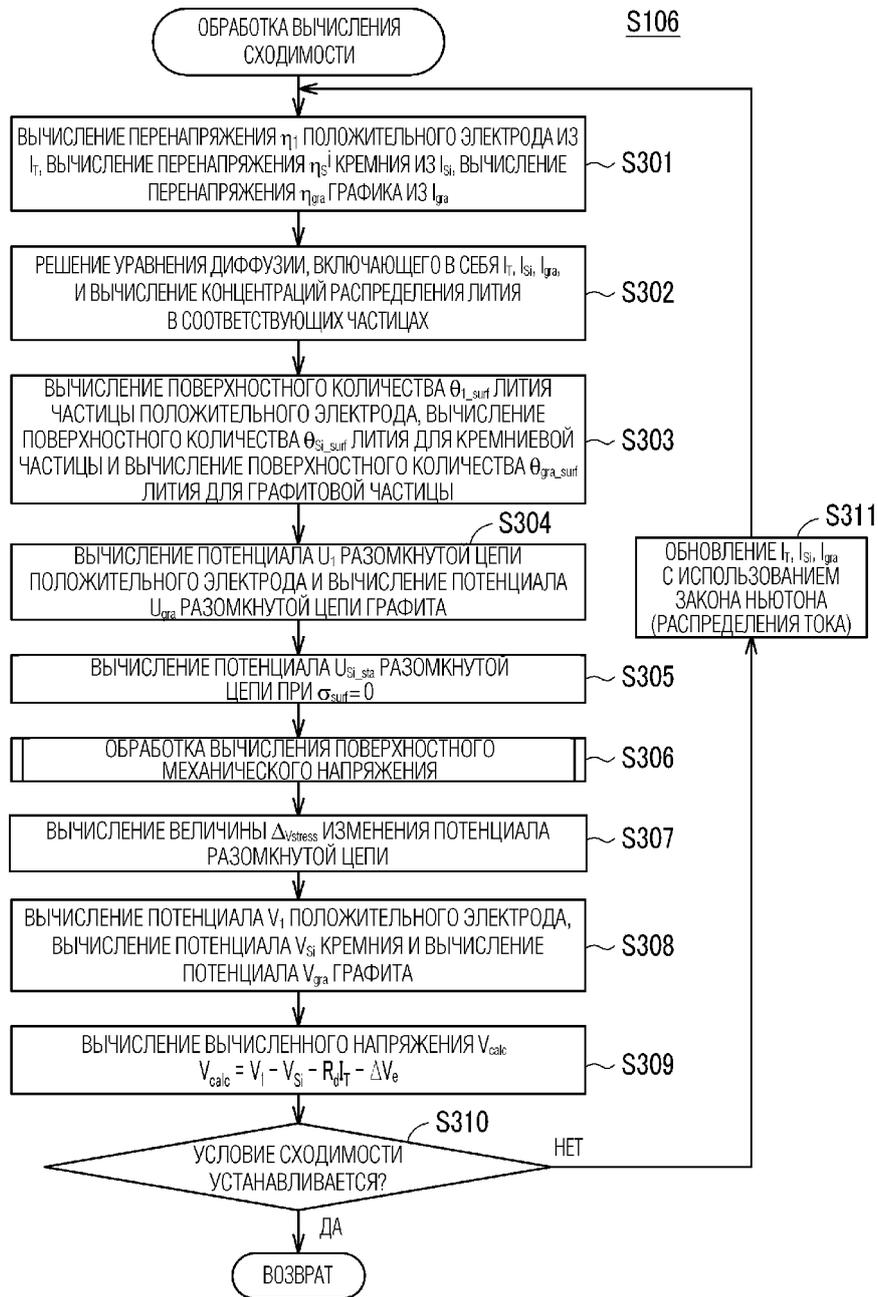
ТОЙОТА ДЗИДОСЯ КАБУСИКИ
КАЙСЯ (JP)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: JP 2015166710 A, 24.09.2015. US
2016375790 A1, 29.12.2016. JP 2014139521 A,
31.07.2014. KR 20180076879 A, 06.07.2018. KR
20180079971 A, 11.07.2018. RU 2566085 C1,
20.10.2015. JP 2015167127 A, 24.09.2015.

(54) СИСТЕМА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ И СПОСОБ ОЦЕНКИ ВНУТРЕННЕГО СОСТОЯНИЯ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электротехники, а именно к системе аккумуляторной батареи и способу оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи, и может быть использовано, например, в электрифицированном транспортном средстве с аккумуляторной батареей. Система включает в себя аккумуляторную батарею, имеющую положительный электрод, включающий в себя активное вещество положительного электрода, и отрицательный электрод, включающий в себя первое и второе активные вещества отрицательного электрода, и устройство управления, которое оценивает внутреннее состояние аккумуляторной батареи на основе модели активного вещества аккумуляторной батареи. Устройство управления вычисляет количество носителей заряда в первом активном

веществе отрицательного электрода на основе модели первого активного вещества, при таком условии, что первое и второе активные вещества отрицательного электрода имеют идентичный потенциал, вычисляет величину изменения потенциала разомкнутой цепи первого активного вещества отрицательного электрода на основе поверхностного механического напряжения первого активного вещества отрицательного электрода и вычисляет потенциал разомкнутой цепи отрицательного электрода из потенциала разомкнутой цепи и величины изменения потенциала разомкнутой цепи первого активного вещества отрицательного электрода. Повышение точности оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи является техническим результатом изобретения. 2 н. и 7 з.п. ф-лы, 25 ил.



ФИГ. 13



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
H01M 10/42 (2006.01)
G01R 31/36 (2006.01)
H02J 7/00 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
H01M 10/42 (2019.08); G01R 31/36 (2019.08); H02J 7/00 (2019.08)

(21)(22) Application: **2019128561, 12.09.2019**

(24) Effective date for property rights:
12.09.2019

Registration date:
20.02.2020

Priority:

(30) Convention priority:
14.09.2018 JP 2018-172614;
06.08.2019 JP 2019-144603

(45) Date of publication: **20.02.2020 Bull. № 5**

Mail address:
129090, Moskva, ul. B. Spasskaya, 25, str. 3, OOO
"Yuridicheskaya firma Gorodisskij i Partnery"

(72) Inventor(s):

TAKAHASHI, Kenji (JP)

(73) Proprietor(s):

TOYOTA JIDOSHA KABUSHIKI KAISHA
(JP)

(54) **ACCUMULATOR BATTERY SYSTEM AND A METHOD FOR EVALUATING THE INTERNAL STATE OF AN ACCUMULATOR BATTERY**

(57) Abstract:

FIELD: electrical engineering.

SUBSTANCE: invention relates to electrical engineering, namely to a storage battery system and a method for evaluating the internal state of an accumulator battery, and can be used, for example, in an electrified vehicle with an accumulator battery. System includes a storage battery having a positive electrode, which includes an active substance of a positive electrode, and a negative electrode, which includes first and second active substances of the negative electrode, and a control device which evaluates the internal state of the battery based on the battery active material model. Control device calculates the number of charge carriers in the first active substance of the negative electrode based on the model of the first

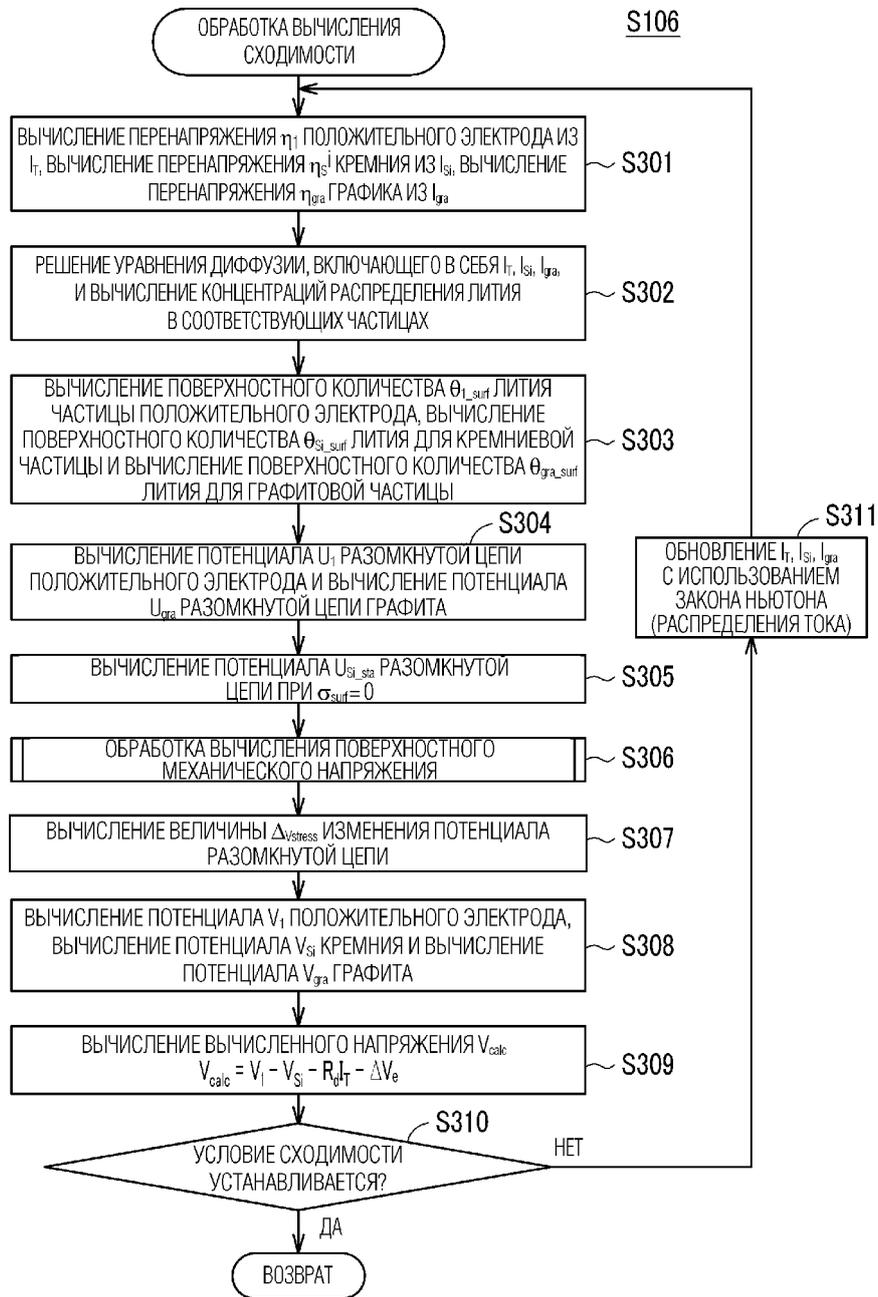
active substance, under such condition that the first and second active substances of the negative electrode have identical potential, calculates a value of variation of potential of the open circuit of the first active substance of the negative electrode on the basis of surface mechanical stress of the first active substance of the negative electrode and calculates open circuit potential of negative electrode from potential of open circuit and value of open active circuit potential of first active substance of negative electrode.

EFFECT: high accuracy of estimating the internal state of a storage battery is the technical result of the invention.

9 cl, 25 dwg

RU 2 714 888 C1

RU 2 714 888 C1



ФИГ. 13

Область техники

[0001] Настоящее раскрытие сущности относится к системе аккумуляторной батареи и к способу оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи.

Уровень техники

5 [0002] Электрифицированное транспортное средство (например, гибридное транспортное средство, электротранспортное средство и т.п.) со смонтированной аккумуляторной батареей получает широкое распространение. В аккумуляторной батарее, предусмотрена система, в которой "зарядная кривая" в качестве кривой зависимости состояния заряда (SOC) от напряжения разомкнутой цепи (OCV), которая
10 должна получаться при заряде аккумуляторной батареи из полностью разряженного состояния, и "разрядная кривая" в качестве кривой SOC-OCV, которая должна получаться при разряде аккумуляторной батареи из полностью заряженного состояния, заметно отклоняются друг от друга. В случае если зарядная кривая и разрядная кривая отклоняются друг от друга таким образом, считается, что в аккумуляторной батарее
15 возникает "гистерезис". Например, публикация не прошедшей экспертизу заявки на патент Японии № 2015-166710 (JP 2015-166710 A) раскрывает технологию, которая оценивает SOC из OCV с учетом гистерезиса аккумуляторной батареи.

Сущность изобретения

[0003] В настоящем раскрытии сущности, оценивается внутреннее состояние
20 аккумуляторной батареи. Оценка внутреннего состояния аккумуляторной батареи включает в себя вычисление различных компонентов потенциала, таких как потенциал разомкнутой цепи положительного электрода, потенциал положительного электрода, потенциал разомкнутой цепи отрицательного электрода и потенциал отрицательного электрода аккумуляторной батареи. Например, OCV аккумуляторной батареи может
25 вычисляться из потенциала разомкнутой цепи положительного электрода и потенциала разомкнутой цепи отрицательного электрода аккумуляторной батареи, и SOC аккумуляторной батареи может оцениваться из вычисленного OCV. В случае если потенциал положительного электрода аккумуляторной батареи становится ниже заданного нижнего предельного потенциала или становится выше заданного верхнего
30 предельного потенциала, вызывается побочная реакция в положительном электроде, и характеристики положительного электрода могут ухудшаться. Аналогично, в случае если потенциал отрицательного электрода находится за пределами заданного диапазона потенциалов, характеристики отрицательного электрода могут ухудшаться. Таким образом, повышается точность вычисления потенциала одного электрода (потенциала
35 положительного электрода или потенциала отрицательного электрода) аккумуляторной батареи, за счет чего можно подавлять ухудшение характеристик положительного электрода и отрицательного электрода аккумуляторной батареи.

[0004] Чтобы улучшать различные характеристики аккумуляторной батареи, проанализирована технология, в которой используется отрицательный электрод (так
40 называемый составной отрицательный электрод), включающий в себя множество активных веществ отрицательного электрода. Например, отрицательный электрод литий-ионной аккумуляторной батареи, раскрытой в публикации не прошедшей экспертизу заявки на патент (Япония) № 2015-167127 (JP 2015-167127 A), включает в себя материал на основе углерода (подробнее, такой материал на основе углерода, как
45 наноуглерод или углеродная нанотрубка) и материал на основе кремния.

[0005] В литий-ионной аккумуляторной батарее, используется отрицательный электрод, включающий в себя материал на основе кремния, за счет чего можно увеличивать полную зарядную емкость по сравнению со случаем, в котором

используется отрицательный электрод, не включающий в себя материал на основе кремния. В случае, если материал на основе кремния включен в отрицательный электрод, известно, что гистерезис кривой SOC-OCV увеличивается по сравнению со случаем, в котором материал на основе кремния не включен в отрицательный электрод (например, см. публикацию не прошедшую экспертизу заявки на патент Японии № 2014-139521 (JP 2014-139521 A)).

[0006] При оценке внутреннего состояния аккумуляторной батареи, имеющей составной отрицательный электрод, рассматривается случай, в котором применяется способ оценки внутреннего состояния предшествующего уровня техники. Тем не менее, в способе оценки предшествующего уровня техники, поскольку гистерезис аккумуляторной батареи не учитывается, точность оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи может относительно понижаться. По этой причине, в аккумуляторной батарее, имеющей составной отрицательный электрод, желательно оценивать внутреннее состояние аккумуляторной батареи с учетом гистерезиса.

[0007] Настоящее раскрытие сущности предоставляет технологию, допускающую повышение точности оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи, имеющей отрицательный электрод, включающий в себя множество активных веществ отрицательного электрода.

[0008] Первый аспект настоящего раскрытия сущности относится к системе аккумуляторной батареи. Система аккумуляторной батареи включает в себя аккумуляторную батарею и устройство управления. Аккумуляторная батарея имеет положительный электрод и отрицательный электрод. Положительный электрод включает в себя активное вещество положительного электрода. Отрицательный электрод включает в себя первое и второе активные вещества отрицательного электрода. Устройство управления выполнено с возможностью оценивать внутреннее состояние аккумуляторной батареи на основе модели активных веществ аккумуляторной батареи. Величина изменения объема первого активного вещества отрицательного электрода с изменением количества носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода превышает величину изменения объема второго активного вещества отрицательного электрода с изменением количества носителей заряда во втором активном веществе отрицательного электрода. Устройство управления выполнено с возможностью, при таком условии, что первое активное вещество отрицательного электрода и второе активное вещество отрицательного электрода имеют идентичный потенциал, вычислять количество носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода на основе модели первого активного вещества. Устройство управления выполнено с возможностью вычислять величину изменения потенциала разомкнутой цепи первого активного вещества отрицательного электрода на основе поверхностного механического напряжения первого активного вещества отрицательного электрода, которое должно определяться согласно количеству носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода. Устройство управления выполнено с возможностью вычислять потенциал разомкнутой цепи отрицательного электрода из потенциала разомкнутой цепи и величины изменения потенциала разомкнутой цепи первого активного вещества отрицательного электрода в состоянии, в котором поверхностное механическое напряжение не формируется в первом активном веществе отрицательного электрода.

[0009] Величина изменения объема первого активного вещества отрицательного электрода с изменением количества носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода (например, в материале на основе кремния) превышает

величину изменения объема второго активного вещества отрицательного электрода с изменением количества носителей заряда во втором активном веществе отрицательного электрода (например, в материале на основе углерода). По этой причине, влияние гистерезиса в первом активном веществе отрицательного электрода превышает влияние гистерезиса во втором активном веществе отрицательного электрода. С учетом этого момента, согласно первому аспекту, количество носителей заряда (например, количество лития) в первом активном веществе отрицательного электрода вычисляется на основе модели первого активного вещества, и количество носителей заряда во втором активном веществе отрицательного электрода вычисляется на основе модели второго активного вещества. Таким образом, поскольку количество носителей заряда вычисляется отдельно для каждого активного вещества отрицательного электрода, можно точно отражать влияние гистерезиса в результате оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи (ниже описываются подробности). Следовательно, можно повышать точность оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи.

[0010] В системе аккумуляторной батареи согласно первому аспекту настоящего раскрытия сущности, устройство управления может быть выполнено с возможностью, при таком условии, что первое активное вещество отрицательного электрода и второе активное вещество отрицательного электрода имеют идентичный потенциал, отдельно вычислять ток, протекающий в первом активном веществе отрицательного электрода, и ток, протекающий во втором активном веществе отрицательного электрода, через обработку вычисления сходимости таким образом, что устанавливается заданное условие сходимости. Устройство управления может быть выполнено с возможностью вычислять распределение концентраций носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода и во втором активном веществе отрицательного электрода посредством решения уравнения диффузии при граничном условии, связанном с током, протекающим в первом активном веществе отрицательного электрода и во втором активном веществе отрицательного электрода. Устройство управления может быть выполнено с возможностью вычислять количество носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода и во втором активном веществе отрицательного электрода из распределения концентраций носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода и во втором активном веществе отрицательного электрода.

[0011] Система аккумуляторной батареи согласно первому аспекту настоящего раскрытия сущности дополнительно может включать в себя датчик напряжения, выполненный с возможностью определять напряжение между положительным электродом и отрицательным электродом. Устройство управления может быть выполнено с возможностью вычислять распределение концентраций носителей заряда в активном веществе положительного электрода посредством решения уравнения диффузии при граничном условии, связанном с током, протекающим в активном веществе положительного электрода. Устройство управления может быть выполнено с возможностью вычислять количество носителей заряда в активном веществе положительного электрода из распределения концентраций носителей заряда в активном веществе положительного электрода. Устройство управления может быть выполнено с возможностью вычислять потенциал положительного электрода на основе потенциала разомкнутой цепи активного вещества положительного электрода, который должен определяться согласно количеству носителей заряда в активном веществе положительного электрода. Устройство управления может быть выполнено с возможностью вычислять потенциал отрицательного электрода на основе потенциала разомкнутой цепи отрицательного электрода. Устройство управления может быть

выполнено с возможностью вычислять ток, протекающий в первом активном веществе отрицательного электрода, с таким условием, что разность потенциалов между потенциалом положительного электрода и потенциалом отрицательного электрода совпадает с напряжением, определенным посредством датчика напряжения, в качестве условия сходимости.

[0012] Согласно первому аспекту, отдельно вычисляются ток, протекающий в первом активном веществе отрицательного электрода, и ток, протекающий во втором активном веществе отрицательного электрода. Вследствие этого, распределение концентраций носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода на основе уравнения диффузии при граничном условии, связанном с током, протекающим в первом активном веществе отрицательного электрода, и распределение концентраций носителей заряда во втором активном веществе отрицательного электрода на основе уравнения диффузии при граничном условии, связанном с током, протекающим во втором активном веществе отрицательного электрода, получаются с большей точностью. Поскольку внутреннее состояние (потенциал разомкнутой цепи или поверхностное механическое напряжение) аккумуляторной батареи вычисляется на основе распределения концентраций носителей заряда (описано ниже), согласно первому аспекту, можно повышать точность оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи.

[0013] В системе аккумуляторной батареи согласно первому аспекту настоящего раскрытия сущности, устройство управления может быть выполнено с возможностью разделять ток, протекающий в первом активном веществе отрицательного электрода, на ток реакции, предусмотренный во внедрении и десорбции носителей заряда, и ток конденсатора, не предусмотренный во внедрении и десорбции носителей заряда, и вычислять перенапряжение при реакции первого активного вещества отрицательного электрода посредством подстановки тока реакции в выражение отношения Батлера-Фольмера. Устройство управления может быть выполнено с возможностью вычислять потенциал отрицательного электрода из потенциала разомкнутой цепи отрицательного электрода и перенапряжения при реакции первого активного вещества отрицательного электрода.

[0014] Согласно первому аспекту, учитывается влияние электрического двойного слоя, который должен формироваться на поверхности активного вещества, и перенапряжение при реакции первого активного вещества отрицательного электрода вычисляется на основе тока реакции в качестве компонента тока, предусмотренного во внедрении и десорбции носителей заряда. Ток конденсатора, не предусмотренный во внедрении и десорбции носителей заряда, удаляется, за счет чего повышается точность вычисления перенапряжения при реакции. По этой причине, можно повышать точность вычисления потенциала отрицательного электрода (= потенциал разомкнутой цепи отрицательного электрода+перенапряжение при реакции).

[0015] В системе аккумуляторной батареи согласно первому аспекту настоящего раскрытия сущности, устройство управления может быть выполнено с возможностью вычислять общее количество носителей заряда в первом и втором активных веществах отрицательного электрода из количества носителей заряда в активном веществе положительного электрода согласно выражению отношения, в котором взаимосвязь, которая должна устанавливаться между количеством носителей заряда в активном веществе положительного электрода и общим количеством носителей заряда в первом и втором активных веществах отрицательного электрода, задается с использованием отношения емкостей касательно емкости положительного электрода к емкости

отрицательного электрода. Устройство управления может быть выполнено с возможностью вычислять количество носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода и во втором активном веществе отрицательного электрода с использованием закона сохранения величины заряда, который должен устанавливаться между величиной временного изменения общего количества носителей заряда в первом и втором активных веществах отрицательного электрода и током, протекающим в активном веществе положительного электрода.

[0016] Согласно первому аспекту, используется выражение отношения, за счет чего не должны обязательно решаться уравнения диффузии в первом и втором активных веществах отрицательного электрода. Кроме того, можно уменьшать параметры, которые должны использоваться при обработке вычисления сходимости. Следовательно, можно дополнительно уменьшать объем вычислений (вычислительную нагрузку, объем запоминающего устройства и т.п.) устройства управления (ниже описываются подробности).

[0017] В системе аккумуляторной батареи согласно первому аспекту настоящего раскрытия сущности, устройство управления может быть выполнено с возможностью вычислять общее количество носителей заряда в первом и втором активных веществах отрицательного электрода из количества носителей заряда в активном веществе положительного электрода согласно выражению отношения, в котором взаимосвязь, которая должна устанавливаться между количеством носителей заряда в активном веществе положительного электрода и общим количеством носителей заряда в первом и втором активных веществах отрицательного электрода, задается с использованием отношения емкостей касательно емкости положительного электрода к емкости отрицательного электрода. Устройство управления может быть выполнено с возможностью вычислять количество носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода и во втором активном веществе отрицательного электрода из величины временного изменения общего количества носителей заряда в первом и втором активных веществах отрицательного электрода согласно заданному выражению отношения, аппроксимирующему то, что потенциал первого активного вещества отрицательного электрода изменяется линейно с изменением количества носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода, и аппроксимирующему то, что потенциал второго активного вещества отрицательного электрода изменяется линейно с изменением количества носителей заряда во втором активном веществе отрицательного электрода.

[0018] Согласно первому аспекту, используется заданное выражение отношения с использованием линейной аппроксимации, за счет чего можно дополнительно уменьшать объем вычислений устройства управления (ниже описываются подробности).

[0019] В системе аккумуляторной батареи согласно первому аспекту настоящего раскрытия сущности, аккумуляторная батарея может представлять собой литий-ионную аккумуляторную батарею. Устройство управления может быть выполнено с возможностью, в случае если потенциал отрицательного электрода, который должен вычисляться из потенциала разомкнутой цепи отрицательного электрода, опускается ниже заданного потенциала выше потенциала металлического лития, в большей степени подавлять электрическую мощность заряда в аккумуляторную батарею, чем в случае, если потенциал отрицательного электрода превышает заданный потенциал.

[0020] Согласно первому аспекту, электрическая мощность заряда в аккумуляторную батарею управляется на основе потенциала отрицательного электрода, оцененного с высокой точностью. Вследствие этого, можно надлежащим образом защищать

отрицательный электрод от ухудшения характеристик (осаждения лития, описанного ниже) отрицательного электрода.

[0021] В системе аккумуляторной батареи согласно первому аспекту настоящего раскрытия сущности, первое активное вещество отрицательного электрода может представлять собой материал на основе кремния, и второе активное вещество отрицательного электрода может представлять собой материал на основе углерода.

[0022] Второй аспект настоящего раскрытия сущности относится к способу оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи. Аккумуляторная батарея имеет положительный электрод и отрицательный электрод. Положительный электрод включает в себя активное вещество положительного электрода. Отрицательный электрод включает в себя первое и второе активные вещества отрицательного электрода. Величина изменения объема первого активного вещества отрицательного электрода с изменением количества носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода превышает величину изменения объема второго активного вещества отрицательного электрода с изменением количества носителей заряда во втором активном веществе отрицательного электрода. Способ представляет собой способ оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи на основе модели активного вещества. Способ включает в себя, при таком условии, что первое активное вещество отрицательного электрода и второе активное вещество отрицательного электрода имеют идентичный потенциал, вычисление количества носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода на основе модели первого активного вещества, вычисления величины изменения потенциала разомкнутой цепи первого активного вещества отрицательного электрода на основе поверхностного механического напряжения первого активного вещества отрицательного электрода, которое должно определяться согласно количеству носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода, и вычисление потенциала разомкнутой цепи отрицательного электрода из потенциала разомкнутой цепи и величины изменения потенциала разомкнутой цепи первого активного вещества отрицательного электрода в состоянии, в котором поверхностное механическое напряжение не формируется в первом активном веществе отрицательного электрода.

[0023] Согласно второму аспекту, аналогично первому аспекту, можно повышать точность оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи.

[0024] Согласно аспектам настоящего раскрытия сущности, в аккумуляторной батарее, имеющей отрицательный электрод, включающий в себя множество активных веществ отрицательного электрода, можно повышать точность оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи.

Краткое описание чертежей

[0025] Ниже описываются признаки, преимущества и техническая и промышленная значимость примерных вариантов осуществления изобретения со ссылкой на прилагаемые чертежи, на которых аналогичные номера обозначают аналогичные элементы, и на которых:

Фиг. 1 является схемой, схематично показывающей общую конфигурацию электрифицированного транспортного средства, в котором монтируется система аккумуляторной батареи согласно варианту 1 осуществления;

Фиг. 2 является схемой, подробнее иллюстрирующей конфигурацию каждого гальванического элемента;

Фиг. 3 является графиком, показывающим пример кривой SOC-OCV батареи в варианте 1 осуществления;

Фиг. 4 является графиком, схематично показывающим изменение потенциала разомкнутой цепи отрицательного электрода с зарядом и разрядом батареи в случае, когда в качестве отрицательного электрода используется простое вещество из кремния;

Фиг. 5 является схемой, иллюстрирующей трехчастичную модель;

5 Фиг. 6 является схемой, иллюстрирующей способ вычисления распределений концентраций лития в частице положительного электрода, кремниевой частице и графитовой частице;

Фиг. 7А является таблицей, иллюстрирующей параметры (переменные и константы), которые должны использоваться в модели батареи;

10 Фиг. 7В является таблицей, иллюстрирующей параметры (переменные и константы), которые должны использоваться в модели батареи;

Фиг. 8 является таблицей, иллюстрирующей дополнительные характеристики (подстрочные индексы), которые должны использоваться в модели батареи;

15 Фиг. 9 является функциональной блок-схемой ECU, связанной с обработкой вычисления потенциала и обработкой оценки SOC в варианте 1 осуществления;

Фиг. 10А является концептуальной схемой, иллюстрирующей переход состояния батареи на характеристической схеме зависимости количества лития на поверхности в кремниевом отрицательном электроде от потенциала разомкнутой цепи кремниевого отрицательного электрода;

20 Фиг. 10В является концептуальной схемой, иллюстрирующей переход состояния батареи на характеристической схеме зависимости количества лития на поверхности в кремниевом отрицательном электроде от потенциала разомкнутой цепи кремниевого отрицательного электрода;

25 Фиг. 10С является концептуальной схемой, иллюстрирующей переход состояния батареи на характеристической схеме зависимости количества лития на поверхности в кремниевом отрицательном электроде от потенциала разомкнутой цепи кремниевого отрицательного электрода;

30 Фиг. 10D является концептуальной схемой, иллюстрирующей переход состояния батареи на характеристической схеме зависимости количества лития на поверхности в кремниевом отрицательном электроде от потенциала разомкнутой цепи кремниевого отрицательного электрода;

Фиг. 10E является концептуальной схемой, иллюстрирующей переход состояния батареи на характеристической схеме зависимости количества лития в отрицательном электроде от потенциала разомкнутой цепи отрицательного электрода;

35 Фиг. 11 является графиком, иллюстрирующим способ вычисления поверхностного механического напряжения;

Фиг. 12 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей последовательность обработки для оценки SOC батареи в варианте 1 осуществления;

40 Фиг. 13 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей обработку вычисления сходимости в варианте 1 осуществления;

Фиг. 14 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей обработку вычисления поверхностного механического напряжения;

Фиг. 15 является концептуальной схемой, иллюстрирующей изменение потенциала отрицательного электрода, когда возникает осаждение лития;

45 Фиг. 16 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей последовательность обработки для оценки SOC батареи в варианте 2 осуществления;

Фиг. 17 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей обработку вычисления сходимости в варианте 2 осуществления;

Фиг. 18 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей обработку вычисления количества лития в варианте 2 осуществления;

Фиг. 19 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей обработку вычисления поверхностного механического напряжения в варианте 2 осуществления; и

Фиг. 20 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей обработку вычисления количества лития в варианте 3 осуществления.

Подробное описание вариантов осуществления изобретения

[0026] Далее подробно описывается вариант осуществления настоящего раскрытия сущности со ссылкой на чертежи. На чертежах, идентичные или аналогичные части представляются посредством идентичных ссылок с номерами, и их описание не повторяется.

[0027] В нижеприведенном описании, в качестве примера описывается конфигурация, в которой система аккумуляторной батареи согласно варианту осуществления настоящего раскрытия сущности монтируется в электрифицированном транспортном средстве. Электрифицированное транспортное средство может представлять собой гибридное транспортное средство (включающее в себя гибридное транспортное средство со штепсельным соединением для заряда от внешнего источника) либо может представлять собой электротранспортное средство. Электрифицированное транспортное средство может представлять собой гибридное транспортное средство, в котором топливный элемент и аккумуляторная батарея комбинируются. "Система аккумуляторной батареи" согласно варианту осуществления настоящего раскрытия сущности не ограничена применением к транспортному средству или может быть стационарной.

Вариант 1 осуществления

Конфигурация системы аккумуляторной батареи

[0028] Фиг. 1 является схемой, схематично показывающей общую конфигурацию электрифицированного транспортного средства, в котором монтируется система аккумуляторной батареи согласно варианту 1 осуществления. Ссылаясь на фиг. 1, транспортное средство 9 представляет собой гибридное транспортное средство и включает в себя электромоторы-генераторы 91, 92, двигатель 93, устройство 94 деления мощности, ведущий вал 95, ведущие колеса 96 и систему 10 аккумуляторной батареи. Система 10 аккумуляторной батареи включает в себя батарею 4, модуль 6 мониторинга, модуль 8 управления мощностью (PCU) и электронный модуль 100 управления (ECU).

[0029] Каждый из электромоторов-генераторов 91, 92 представляет собой вращающуюся электрическую машину переменного тока и, например, представляет собой синхронный электромотор трехфазного переменного тока, в котором постоянный магнит встраивается в ротор. Электромотор-генератор 91 главным образом используется в качестве генератора мощности, который приводится в действие посредством двигателя 93 за счет устройства 94 деления мощности. Электрическая мощность, вырабатываемая посредством электромотора-генератора 91, подается в электромотор-генератор 92 или батарею 4 через PCU 8.

[0030] Электромотор-генератор 92 главным образом работает в качестве электромотора и приводит в движение ведущие колеса 96. Электромотор-генератор 92 приводится в действие посредством приема, по меньшей мере, одной из электрической мощности из батареи 4 и вырабатываемой электрической мощности электромотора-генератора 91, и мощность приведения в движение электромотора-генератора 92 передается на ведущий вал 95. Во время торможения транспортного средства или

уменьшения ускорения на спуске, электромотор-генератор 92 работает в качестве генератора мощности, чтобы выполнять выработку рекуперативной электрической мощности. Электрическая мощность, вырабатываемая посредством электромотора-генератора 92, подается в батарею 4 через PCU 8.

5 [0031] Двигатель 93 представляет собой двигатель внутреннего сгорания, который выводит мощность посредством преобразования энергии сгорания, которая должна вырабатываться посредством сгорания воздушно-топливной смеси воздуха и топлива, в кинетическую энергию элемента движения, такого как поршень или ротор.

10 [0032] Устройство 94 деления мощности включает в себя, например, планетарный зубчатый механизм (не показан), имеющий три вращательных вала солнечной шестерни, водила и коронной шестерни. Устройство 94 деления мощности делит мощность, доставленную из двигателя 93, на мощность для приведения в действие электромотора-генератора 91 и мощность для приведения в движение ведущих колес 96.

15 [0033] Батарея 4 представляет собой собранную батарею, включающую в себя множество гальванических элементов 5 (одиночных батарей). В варианте осуществления, каждый гальванический элемент 5 представляет собой литий-ионную аккумуляторную батарею. В дальнейшем описывается конфигурация каждого гальванического элемента 5 со ссылкой на фиг. 2.

20 [0034] Батарея 4 накапливает электрическую мощность для приведения в действие электромоторов-генераторов 91, 92 и подает электрическую мощность в электромоторы-генераторы 91, 92 через PCU 8. Батарея 4 принимает и заряжается вырабатываемой электрической мощностью через PCU 8 во время выработки мощности электромоторов-генераторов 91, 92.

25 [0035] Модуль 6 мониторинга включает в себя датчик 71 напряжения и температурный датчик 72. Датчик 71 напряжения определяет напряжение каждого гальванического элемента 5, включенного в батарею 4, в качестве собранной батареи. Температурный датчик 72 определяет температуру каждого гальванического элемента 5. Каждый датчик выводит результат определения в ECU 100.

30 [0036] Датчик 71 напряжения может определять напряжение VB, например, с множеством гальванических элементов 5, соединенных параллельно в качестве модуля мониторинга. Температурный датчик 72 может определять температуру ТВ с множеством гальванических элементов 5, расположенных рядом друг с другом в качестве модуля мониторинга. Таким образом, в варианте осуществления, модуль мониторинга не ограничен конкретным образом. Таким образом, в нижеприведенном описании, для упрощения описания, просто описывается то, что "напряжение VB батареи 4 определяется", или "температура ТВ батареи 4 определяется". В отношении потенциала, OCV и SOC, аналогично, батарея 4 описывается как модуль выполнения каждого вида обработки.

40 [0037] PCU 8 выполняет двунаправленное преобразование электрической мощности между батареей 4 и электромоторами-генераторами 91, 92 в ответ на управляющий сигнал из ECU 100. PCU 8 выполнен с возможностью отдельно управлять состояниями электромоторов-генераторов 91, 92 и, например, может переводить электромотор-генератор 92 в состояние снабжения мощностью при переводе электромотора-генератора 91 в состояние рекуперации (состояние выработки мощности). PCU 8 45 включает в себя, например, два инвертора, которые предоставляются согласно электромоторам-генераторам 91, 92, и преобразователь, который повышает постоянное напряжение, подаваемое в каждый из инверторов, так что оно равно или выше выходного напряжения батареи 4 (все не показаны).

[0038] ECU 100 включает в себя центральный процессор 100А (CPU), запоминающее устройство 100В (более конкретно, постоянное запоминающее устройство (ROM) и оперативное запоминающее устройство (RAM)) и порт ввода/вывода (не показан) для ввода и вывода различных сигналов. ECU 100 оценивает состояние батареи 4 на основе
 5 сигналов, принимаемых из датчиков модуля 6 мониторинга, и программ и карт, сохраненных в запоминающем устройстве 100В. В качестве основной обработки, которая должна выполняться посредством ECU 100, примерно иллюстрируется "обработка вычисления потенциала" для вычисления различных компонентов
 10 потенциала, включающих в себя потенциал V_1 положительного электрода и потенциал V_2 отрицательного электрода батареи 4. ECU 100 оценивает SOC батареи 4 или управляет зарядом и разрядом батареи 4 согласно результату "обработки вычисления потенциала".

[0039] Потенциал V_1 положительного электрода представляет собой потенциал положительного электрода (см. фиг. 2), когда батарея 4 находится в состоянии
 15 электропроводности. Потенциал V_2 отрицательного электрода представляет собой потенциал отрицательного электрода, когда батарея 4 находится в состоянии электропроводности. Когда батарея 4 находится в состоянии отсутствия электропроводности (в состоянии без нагрузки), потенциал положительного электрода называется "потенциалом U_1 разомкнутой цепи (ОСР) положительного электрода".
 20 Потенциал отрицательного электрода называется "потенциалом U_2 разомкнутой цепи отрицательного электрода". Хотя необязательно может задаваться потенциал, который должен быть опорным для этих потенциалов (и других потенциалов, описанных ниже), в варианте осуществления, потенциал металлического лития определяется в качестве опорного потенциала.

[0040] Фиг. 2 является схемой, подробнее иллюстрирующей конфигурацию каждого гальванического элемента 5. На фиг. 2, гальванический элемент 5 показан в виде в
 25 перспективе.

[0041] Ссылаясь на фиг. 2, гальванический элемент 5 имеет квадратный (в форме
 30 практически прямоугольного параллелепипеда) кожух 51 батареи. Верхняя поверхность кожуха 51 батареи герметизируется посредством крышки 52. Первый конец каждого из контактного вывода 53 положительного электрода и контактного вывода 54
 отрицательного электрода выступает из крышки 52 к внешней стороне. Вторые концы контактного вывода 53 положительного электрода и контактного вывода 54
 35 отрицательного электрода соединяются с внутренним контактным выводом положительного электрода и внутренним контактным выводом отрицательного электрода (оба не показаны) в кожухе 51 батареи, соответственно. В кожухе 51 батареи размещается электродный узел 55. Электродный узел 55 формируется посредством
 наслаивания положительного электрода и отрицательного электрода через сепаратор и обмотки многослойного материала. Электролит сохраняется посредством
 40 положительного электрода, отрицательного электрода, сепаратора и т.п.

[0042] Для положительного электрода, сепаратора и электролита, известные конфигурации и материалы связаны так, как положительный электрод, сепаратор и электролит литий-ионной аккумуляторной батареи могут использоваться,
 45 соответственно. В качестве примера, для положительного электрода, может использоваться троичный материал, в котором часть оксида лития и кобальта заменяется посредством никеля и марганца. Для сепаратора, может использоваться полиолефин (например, полиэтилен или полипропилен). Электролит содержит органический растворитель (например, смешанный растворитель из диметилкарбоната (DMC),

этилметилкарбоната (EMC) и этиленкарбоната (EC)), литиевую соль (например, LiPF_6), добавку (например, бис(оксалат)борат лития (LiBOB) или $\text{Li}[\text{PF}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_2]$) и т.п.

[0043] Конфигурация гальванического элемента не ограничена конкретным образом, и гальванический элемент может иметь конфигурацию, в которой электродный узел имеет многослойную структуру вместо намотанной структуры. Кожух батареи не ограничен квадратным кожухом батареи, и может использоваться цилиндрический или многослойный кожух батареи.

Гистерезис кривой SOC-OCV

[0044] В предшествующем уровне техники, типичное активное вещество отрицательного электрода литий-ионной аккумуляторной батареи представляет собой материал на основе углерода, такой как графит. Напротив, в варианте осуществления, композиционный материал из материала на основе кремния (Si или SiO) и графита используется в качестве активного вещества отрицательного электрода. Это обусловлено тем, что в случае, если материал на основе кремния включен, плотность энергии батареи 4 увеличивается, за счет этого увеличивая полную зарядную емкость батареи 4. С другой стороны, в случае если материал на основе кремния включен, гистерезис заметно появляется в батарее 4.

[0045] Фиг. 3 является графиком, показывающим пример кривой SOC-OCV батареи 4 в варианте 1 осуществления. На фиг. 3 и фиг. 10А-фиг. 11, описанных ниже, горизонтальная ось представляет SOC батареи 4, и вертикальная ось представляет OCV батареи 4. В этом подробном описании, OCV означает напряжение в состоянии, в котором напряжение аккумуляторной батареи в достаточной степени ослабляется, т.е. в состоянии, в котором ослабляется распределение концентрации (в варианте осуществления, распределение концентрации лития) носителей заряда в активном веществе.

[0046] На фиг. 3, показаны зарядная кривая CHG и разрядная кривая DCH батареи 4. Зарядная кривая CHG получается посредством повторения заряда и приостановки (прекращения заряда) после того, как батарея 4 переводится в полностью разряженное состояние. Разрядная кривая DCH получается посредством повторения разряда и приостановки (прекращения разряда) после того, как батарея 4 переводится в полностью заряженное состояние.

[0047] Подробно, зарядная кривая CHG может получаться следующим образом. Во-первых, батарея 4 в полностью разряженном состоянии подготавливается и заряжается, например, с величиной электричества, соответствующей SOC в 5%. После того, как величина электричества заряжается, заряд прекращается, и батарея 4 оставляется в этом состоянии в течение времени (например, в течение 30 минут) до тех пор, пока не будет исключена поляризация, вызываемая посредством заряда. После того, как время оставления истекло, OCV батареи 4 измеряется. Затем комбинация (SOC и OCV) SOC (=5%) после заряда и измеренного OCV проиллюстрирована на чертеже.

[0048] После этого, начинается заряд (заряд от SOC=5-10%) батареи 4 с величиной электричества, соответствующей SOC со следующими 5%. В случае если заряд завершается, аналогично, OCV батареи 4 измеряется после того, как время оставления истекло. Затем состояние (комбинация SOC и OCV) батареи 4 проиллюстрировано снова из результата измерений OCV. После этого, идентичная процедура повторяется до тех пор, пока батарея 4 не достигнет полностью заряженного состояния. Зарядная кривая CHG может получаться посредством выполнения такого измерения.

[0049] Аналогично, до тех пор, пока батарея 4 не достигнет полностью разряженного состояния из полностью заряженного состояния, OCV батареи 4 в SOC с интервалами

в 5% измеряется при повторении разряда и прекращения разряда батареи 4 по очереди. Разрядная кривая DCH может получаться посредством выполнения такого измерения. Полученная зарядная кривая CHG и разрядная кривая DCH сохраняются в запоминающем устройстве 100B ECU 100.

5 [0050] OCV на зарядной кривой CHG упоминается как "зарядное OCV", и OCV на разрядной кривой DCH упоминается как "разрядное OCV". Зарядное OCV указывает наибольшее значение OCV при каждом SOC, и разрядное OCV указывает наименьшее значение OCV при каждом SOC. Состояние батареи 4 проиллюстрировано на зарядном OCV, разрядном OCV или области (в дальнейшем в этом документе называемой
10 "промежуточной областью A"), окруженной посредством зарядного OCV и разрядного OCV (см. фиг. 10A-11, описанные ниже). Отклонение между зарядным OCV и разрядным OCV (например, возникновение разности напряжений приблизительно в 100 мВ) представляет присутствие гистерезиса в батарее 4.

[0051] В случае если композиционный материал, включающий в себя как материал
15 на основе кремния, так и графит, используется в качестве активного вещества отрицательного электрода, как показано на фиг. 3, область SOC, в которой возникает значительный гистерезис батареи 4, ограничена областью частичного SOC (на фиг. 3, областью SOC меньше Sc). Значение Sc может получаться посредством выполнения вышеописанного измерения заранее.

20 Поверхностное механическое напряжение активного вещества отрицательного электрода

[0052] В качестве фактора, для которого гистерезис возникает в батарее 4, рассматривается изменение объема активного вещества отрицательного электрода с зарядом и разрядом. Активное вещество отрицательного электрода расширяется с
25 внедрением лития (носителей заряда) и сжимается с десорбцией лития. Такое изменение объема активного вещества отрицательного электрода приводит к механическому напряжению на поверхности и в активном веществе отрицательного электрода, и даже в состоянии, в котором концентрация лития в активном веществе отрицательного электрода ослабляется, механическое напряжение остается на поверхности
30 отрицательного электрода. Механическое напряжение, остающееся на поверхности отрицательного электрода, считается механическим напряжением в состоянии, в котором балансируются механическое напряжение, сформированное в активном веществе отрицательного электрода, и различные виды силы, включающей в себя силу реакции, которая должна прикладываться из периферийного элемента (связывающего, проводящего
35 вспомогательного средства и т.п.) активного вещества отрицательного электрода к активному веществу отрицательного электрода, с изменением объема активного вещества отрицательного электрода. В дальнейшем в этом документе, механическое напряжение описывается как "поверхностное механическое напряжение σ_{surf} ".

[0053] Величина изменения объема материала на основе кремния с внедрением или
40 десорбцией лития превышает величину изменения объема графита. В частности, в случае если минимальный объем в состоянии, в котором литий не внедряется, используется в качестве опорного, в то время как величина изменения объема (скорость расширения) графита с внедрением лития составляет приблизительно 1,1 раз, величина изменения объема материала на основе кремния максимум составляет приблизительно четыре
45 раза. По этой причине, в случае если активное вещество отрицательного электрода включает в себя материал на основе кремния, поверхностное механическое напряжение σ_{surf} увеличивается по сравнению со случаем, в котором активное вещество отрицательного электрода не включает в себя материал на основе кремния (в случае,

если активное вещество отрицательного электрода представляет собой графит).

[0054] Поверхностное механическое напряжение σ_{surf} может измеряться (оцениваться) через тонкопленочную оценку. В дальнейшем описывается просто пример способа измерения поверхностного механического напряжения σ_{surf} . Во-первых, измеряется

5 изменение кривизны к отрицательного электрода в качестве тонкой пленки, деформированной посредством поверхностного механического напряжения σ_{surf} .

Например, кривизна к может оптически измеряться с использованием предлагаемой на рынке системы измерения радиуса кривизны. Затем поверхностное механическое напряжение σ_{surf} может вычисляться посредством подстановки измеренной кривизны к и константы (модуля Юнга, коэффициента Пуассона, толщины и т.п.), определенной согласно материалу и форме отрицательного электрода (активного вещества отрицательного электрода и периферийный элемент), в формулу Стонея (на предмет 10 подробностей измерения механического напряжения, например, см. работу "In Situ Measurements of Stress-Potential Coupling in Lithiated Silicon", авторов V. A. Sethuraman и др., Journal of The Electrochemical Society, 157(11) A1253-A1261 (2010)).

[0055] Потенциал V_2 отрицательного электрода определяется посредством поверхностного состояния активного вещества отрицательного электрода. Подробнее, потенциал V_2 отрицательного электрода определяется посредством количества лития 20 (θ_2 , описанного ниже) на поверхности активного вещества отрицательного электрода и поверхностного механического напряжения σ_{surf} (см. выражение (20), описанное ниже). В случае если используется материал, который может приводить к большому изменению объема с зарядом и разрядом, такой как материал на основе кремния, как 25 описано ниже, поверхностное механическое напряжение σ_{surf} изменяется с увеличением или уменьшением количества лития в активном веществе отрицательного электрода, за счет чего потенциал U_2 разомкнутой цепи отрицательного электрода может увеличиваться или уменьшаться.

[0056] Фиг. 4 является графиком, схематично показывающим изменение потенциала разомкнутой цепи отрицательного электрода с зарядом и разрядом батареи в случае, 30 когда в качестве отрицательного электрода используется простое вещество из кремния. На фиг. 4, горизонтальная ось представляет количество θ_{Si} лития на поверхности кремниевого активного вещества отрицательного электрода, и вертикальная ось представляет потенциал U_{Si} разомкнутой цепи отрицательного электрода. То же 35 применимо к фиг. 10А-11, описанным ниже.

[0057] На фиг. 4, схематично показан пример изменения потенциала U_{Si} разомкнутой цепи отрицательного электрода простого вещества кремния в случае, если, во-первых, заряд и прекращение заряда повторяется для каждого SOC в несколько % от состояния количества $\theta_{\text{Si_SOC0}}$ лития, соответствующего SOC=0%, до состояния количества 40 $\theta_{\text{Si_SOC100}}$ лития, соответствующего SOC=100%, и затем, разряд и прекращение разряда повторяются для каждого SOC в несколько % от состояния количества $\theta_{\text{Si_SOC100}}$ лития до состояния количества $\theta_{\text{Si_SOC0}}$ лития.

[0058] Результат, показанный на фиг. 4, может получаться посредством оценки для гальванического элемента, включающего в себя положительный электрод и отрицательный электрод, сформированные из простого вещества кремния, посредством 45 обеспечения в гальваническом элементе эталонного электрода. Альтернативно,

результат, показанный на фиг. 4, может получаться посредством оценки для гальванического полуэлемента, включающего в себя кремниевый отрицательный электрод и металлический литий противозэлектрода.

[0059] В условиях непрерывной зарядки на поверхности активного материала кремниевого отрицательного электрода генерируется, главным образом, предел σ_{com} текучести при сжатии (поверхностное напряжение σ_{surf} становится пределом текучести при сжатии σ_{com}). В этом случае потенциал разомкнутого контура кремниевого отрицательного электрода уменьшается по сравнению с идеальным (виртуальным) состоянием, в котором поверхностное напряжение σ_{surf} не создается. В последующем описании идеальное состояние, в котором поверхностное напряжение σ_{surf} не генерируется, называется «идеальным состоянием». В условиях непрерывной разрядки на поверхности активного материала кремниевого отрицательного электрода в основном генерируется предел σ_{ten} текучести при растяжении (поверхностное напряжение σ_{surf} становится поверхностным пределом σ_{ten} текучести при растяжении). В этом случае потенциал разомкнутого контура кремниевого отрицательного электрода увеличивается по сравнению с идеальным состоянием.

[0060] В случае если потенциал U_{Si} разомкнутой цепи отрицательного электрода снижается по сравнению с идеальным состоянием, OCV в качестве разности ($=U_1 - U_{Si}$) между потенциалом U_1 разомкнутой цепи положительного электрода и потенциалом U_{Si} разомкнутой цепи отрицательного электрода увеличивается, и в случае, если потенциал U_{Si} разомкнутой цепи отрицательного электрода увеличивается, OCV снижается. Таким образом, в случае если активное вещество отрицательного электрода представляет собой материал на основе кремния, зарядное OCV и разрядное OCV отклоняются друг от друга, с изменением потенциала U_{Si} разомкнутой цепи отрицательного электрода вследствие поверхностного механического напряжения σ_{surf} . По этой причине, потенциал U_{Si} разомкнутой цепи отрицательного электрода вычисляется с учетом влияния поверхностного механического напряжения σ_{surf} , за счет чего можно вычислять OCV с высокой точностью и за счет этого повышать точность оценки SOC для батареи, использующей материал на основе кремния в качестве отрицательного электрода.

35 Модель батареи

[0061] Далее подробно описывается модель батареи (модель активного вещества), которая используется для оценки внутреннего состояния батареи 4 в варианте 1 осуществления. В варианте 1 осуществления, используется трехчастичная модель, в которой положительный электрод типично представляется посредством одного активного вещества (одной частицы), и отрицательный электрод типично представляется посредством двух частиц посредством материала активного вещества отрицательного электрода.

[0062] Фиг. 5 является схемой, иллюстрирующей трехчастичную модель. Ссылаясь на фиг. 5, в трехчастичной модели варианта 1 осуществления, положительный электрод батареи 4 представляется как одна частица, сформированная из активного вещества положительного электрода (например, троичного материала). Частица описывается как "частица 1 положительного электрода" для упрощения. Отрицательный электрод представляется как две частицы. Первая частица (модель первого активного вещества) формируется из материала на основе кремния в активном веществе отрицательного

электрода, и вторая частица (модель второго активного вещества) формируется из графита в активном веществе отрицательного электрода. Для упрощения, первая частица упоминается как "кремниевая частица 21", а вторая частица упоминается как "графитовая частица 22". Потенциал кремниевой частицы 21 описывается как "потенциал V_{Si} кремния", а потенциал графитовой частицы 22 описывается как "потенциал V_{gra} графита".

[0063] Фиг. 5 показывает форму во время разряда батареи 4. Во время разряда батареи 4, ионы лития (указываемые посредством Li^+) выделяются на поверхности раздела между кремниевой частицей 21 и электролитом и поверхности раздела между графитовой частицей 22 и электролитом. Ток, протекающий в кремниевой частице 21 с выделением ионов лития, упоминается как "ток I_{Si} кремния", и ток, протекающий в графитовой частице 22 с выделением ионов лития, упоминается как "ток I_{gra} графита". Полный ток, протекающий в батарее 4, представляется посредством I_T . Как следует понимать из фиг. 5, в трехчастичной модели варианта осуществления, полный ток I_T распределяется на ток I_{Si} кремния и ток I_{gra} графита.

[0064] Во время заряда батареи 4, в то время как направление тока изменено на противоположное относительно направления, показанного на фиг. 5 (не показано), взаимосвязь распределения полного тока I_T на ток I_{Si} кремния и ток I_{gra} графита является идентичной. В этом подробном описании, ток во время заряда показан как отрицательный, и ток во время разряда показан как положительный.

[0065] Как описано ниже, в трехчастичной модели варианта 1 осуществления, вычисляется распределение концентраций лития в каждой частице из частицы 1 положительного электрода, кремниевой частицы 21 и графитовой частицы 22.

[0066] Фиг. 6 является схемой, иллюстрирующей способ вычисления распределений концентраций лития в частице 1 положительного электрода, кремниевой частице 21 и графитовой частице 22. Ссылаясь на фиг. 6, в трехчастичной модели, в сферической частице 1 положительного электрода, предполагается, что распределение концентраций лития в периферийном направлении полярных координат является равномерным, и учитывается только распределение концентраций лития в радиальном направлении полярных координат. Другими словами, внутренний режим частицы 1 положительного электрода представляет собой одномерную модель, в которой направление перемещения лития ограничено радиальным направлением.

[0067] Частица 1 положительного электрода виртуально разделяется на N (где N : натуральное число, равное или большее 2) областей в радиальном направлении. Области отличаются друг от друга посредством дополнительного символа k (где $k=1-N$). Концентрация c_{1k} лития в области k представляется как функция позиции r_{1k} области k в радиальном направлении частицы 1 положительного электрода и времени t (см. выражение (1), описанное ниже).

$$c_{s1k} = c_{s1}(r_{1k}, t) \quad \dots (1)$$

[0068] Хотя в дальнейшем описывается подробный способ вычисления, в варианте осуществления, концентрация c_{s1k} лития каждой области k вычисляется (т.е. распределение концентраций лития вычисляется), и вычисленная концентрация c_{1k} лития нормализуется. В частности, как показано в выражении (2), отношение вычисленного значения концентрации c_{1k} лития к максимальному значению $c_{1,max}$ (в дальнейшем в этом документе называемое "предельной концентрацией лития") концентрации лития

вычисляется для каждой области k . Предельная концентрация $c_{1,\max}$ лития представляет собой концентрацию, определенную согласно типу активного вещества положительного электрода, и известна через документы.

$$\theta_{1k} = \frac{c_{s1k}}{c_{s1k,\max}} \quad \dots (2)$$

[0069] В дальнейшем в этом документе, θ_{1k} в качестве значения после нормализации упоминается как "локальное количество лития" области k . Локальное количество θ_{1k} лития принимает значение в диапазоне от 0 до 1 согласно количеству лития, включенному в область k частицы 1 положительного электрода. Локальное количество θ_{1N} лития в крайней внешней периферийной области N (т.е. на поверхности частицы 1 положительного электрода), где $k=N$ упоминается как "поверхностное количество θ_{1_surf} лития". Как показано в выражении (3), описанном ниже, получается сумма произведений объема v_{1k} и локального количества θ_{1k} лития области k (где $k=1-N$), и значение, полученное посредством деления суммы на объем частицы 1 положительного электрода (объем активного вещества положительного электрода), упоминается как "среднее количество лития" и представляется посредством θ_{1_ave} .

$$\theta_{1_ave} = \frac{1}{V_{s_1}} \sum_{k=1}^N v_{1k} \theta_{1k} \quad \dots (3)$$

[0070] Хотя частица (частица 1 положительного электрода), представляющая активное вещество положительного электрода, описывается в качестве примера на фиг. 6, способ вычисления распределений концентраций лития и (распределений) локальных количеств лития в частицах (кремниевой частицы 21 и графитовой частицы 22), представляющих активное вещество отрицательного электрода, является идентичным. Хотя число разделенных областей между частицей 1 положительного электрода и кремниевой частицей 21 и число разделенных областей между частицей 1 положительного электрода и графитовой частицей 22 могут отличаться друг от друга, в варианте осуществления, оба из чисел разделенных областей могут составлять N .

[0071] Фиг. 7А и 7В являются таблицами, иллюстрирующими параметры (переменные и константы), которые должны использоваться в модели батареи. Фиг. 8 является таблицей, иллюстрирующей дополнительные символы (подстрочные индексы), которые должны использоваться в модели батареи. Как показано на фиг. 7А-8, дополнительный символ i служит для того, чтобы различать между тремя частицами, и $i=1$, S_i или gra . Случай, в котором $i=1$, означает то, что параметры являются значениями в частице 1 положительного электрода, случай, в котором $i=S_i$, означает то, что параметры являются значениями в кремниевой частице 21, и случай, в котором $i=gra$, означает то, что параметры являются значениями в графитовой частице 22. Из параметров, которые должны использоваться в модели батареи, параметры с присоединенным дополнительным символом e означают значения в электролите, и параметры с присоединенным дополнительным символом s означают значения в активном веществе.

Функциональные блоки

[0072] Хотя различные компоненты потенциала, которые вычисляются через обработку вычисления потенциала, могут использоваться для различных видов обработки или управления, в варианте 1 осуществления, конфигурация, в которой "обработка оценки SOC" для оценки SOC батареи 4 выполняется на основе результата обработки вычисления потенциала. В варианте осуществления, до оценки SOC батареи

4, многократно выполняется последовательность обработки (вычислительной обработки с использованием итерационного способа) для определения того, как полный ток I_T распределяется на ток (ток I_{Si} кремния), протекающий в кремниевой частице 21, и ток (ток I_{gra} графита), протекающий в графитовой частице 22.

[0073] Фиг. 9 является функциональной блок-схемой ECU 100, связанной с обработкой вычисления потенциала и обработкой оценки SOC в варианте 1 осуществления. Ссылаясь на фиг. 9, ECU 100 включает в себя модуль 110 задания параметров, модуль 121 вычисления плотности обменного тока, модуль 122 вычисления перенапряжения при реакции, модуль 131 вычисления распределения концентраций, модуль 132 вычисления количества лития, модуль 133 вычисления поверхностного механического напряжения, модуль 134 вычисления величины изменения потенциала разомкнутой цепи, модуль 135 вычисления потенциала разомкнутой цепи, модуль 141 вычисления разности концентраций соли, модуль 142 вычисления перенапряжения концентрации соли, модуль 151 определения условий сходимости, модуль 152 распределения тока и модуль 160 оценки SOC.

[0074] Модуль 110 задания параметров выводит параметры, которые должны использоваться при вычислении в других функциональных блоках. В частности, модуль 110 задания параметров принимает напряжение VB батареи 4 из датчика 71 напряжения и принимает температуру TB аккумуляторного модуля (не показан) из температурного датчика 72. Модуль 110 задания параметров задает напряжение VB в качестве измеренного напряжения V_{meas} батареи 4 и преобразует температуру TB в абсолютную температуру T (единицы: градусы Кельвина). Измеренное напряжение V_{meas} и абсолютная температура T (или температура TB) выводятся в другие функциональные блоки. Поскольку абсолютная температура T выводится из множества функциональных блоков, чтобы не допускать усложнения чертежей, стрелки, указывающие передачу абсолютной температуры T, опускаются.

[0075] Помимо этого, модуль 110 задания параметров выводит коэффициенты D_{s1} , D_{s_Si} , D_{s_gra} диффузии в модуль 131 вычисления распределения концентраций. В качестве коэффициентов D_{s1} , D_{s_Si} , D_{s_gra} диффузии, желательно, если различные значения (эти значения могут быть средними количествами лития или поверхностными количествами лития) могут задаваться согласно локальным количествам θ_1 , θ_{Si} , θ_{gra} лития, соответственно.

[0076] Хотя ниже описываются подробности, при вычислительной обработке с использованием итерационного способа, которая должна выполняться посредством модуля 151 определения условий сходимости и модуля 152 распределения тока, в качестве параметров, заданных переменными, используются ток I_{Si} кремния, ток I_{gra} графита и полный ток I_T . Модуль 110 задания параметров принимает токи (I_{Si} , I_{gra} , I_T), заданные посредством модуля 152 распределения тока во время предыдущего вычисления, и выводит эти токи в качестве параметров, которые должны использоваться при настоящем вычислении, в другие функциональные блоки.

[0077] Модуль 121 вычисления плотности обменного тока принимает абсолютную температуру T из модуля 110 задания параметров и принимает поверхностное количество θ_{1_surf} лития частицы 1 положительного электрода, поверхностное количество θ_{Si_surf} лития для кремниевой частицы 21 и поверхностное количество θ_{gra_surf} лития для графитовой частицы 22 из модуля 132 вычисления количества лития. Модуль 121

вычисления плотности обменного тока вычисляет плотность i_{0_1} обменного тока частицы 1 положительного электрода, плотность i_{0_Si} обменного тока кремниевой частицы 21 и плотность i_{0_gra} обменного тока графитовой частицы 22 на основе

5 параметров, принимаемых из других функциональных блоков.

[0078] Подробнее, плотность i_{0_1} обменного тока представляет собой плотность тока, когда плотность анодного тока, соответствующая окислительной реакции в частице 1 положительного электрода, и плотность катодного тока, соответствующая восстановительной реакции в частице 1 положительного электрода, становятся равными

10 друг другу. Плотность i_{0_1} обменного тока имеет характеристику в зависимости от поверхностного количества θ_{1_surf} лития частицы 1 положительного электрода и абсолютной температуры T . Соответственно, карта (не показана), указывающая взаимосвязь соответствия плотности i_{0_1} обменного тока, поверхностного количества

15 θ_{1_surf} лития и абсолютной температуры T , подготавливается заранее, за счет чего плотность i_{0_1} обменного тока может вычисляться из поверхностного количества θ_{1_surf} лития (описано ниже), вычисленного посредством модуля 132 вычисления количества лития, и абсолютной температуры T . То же применимо к плотности i_{0_Si} обменного

20 тока кремниевой частицы 21 и плотности i_{0_gra} обменного тока графитовой частицы 22, и в силу этого описание не повторяется.

[0079] Модуль 122 вычисления перенапряжения при реакции принимает абсолютную температуру T из модуля 110 задания параметров и принимает ток I_{Si} кремния, ток I_{gra} графита и полный ток I_T из модуля 110 задания параметров. Модуль 122 вычисления

25 перенапряжения при реакции также принимает плотности i_{0_1} , i_{0_Si} , i_{0_gra} обменного тока из модуля 121 вычисления плотности обменного тока. Затем модуль 122 вычисления перенапряжения при реакции вычисляет перенапряжение η_1 при реакции (перенапряжение положительного электрода) частицы 1 положительного электрода, перенапряжение

30 η_{Si} при реакции (перенапряжение кремния) кремниевой частицы 21 и перенапряжение η_{gra} при реакции (перенапряжение графита) графитовой частицы 22 согласно выражениям (4)-(6), описанным ниже, которые должны извлекаться из выражения отношения Батлера-Фольмера, соответственно. Перенапряжение при реакции также упоминается как перенапряжение при активационной поляризации и представляет собой перенапряжение,

35 связанное с реакцией при переносе заряда (реакцией внедрения и десорбции лития). Вычисленное перенапряжение η_1 , η_{Si} , η_{gra} при реакции выводится в модуль 152 распределения тока.

$$40 \quad \eta_1 = \frac{2RT}{\beta_1 F} \sinh^{-1} \left(\frac{-\beta_1 I_T}{2L_1 a_{s1} i_{0_1}(\theta_1, T)} \right) \quad \dots (4)$$

$$\eta_{Si} = \frac{2RT}{\beta_{Si} F} \sinh^{-1} \left(\frac{\beta_{Si} I_{Si}}{2L_2 a_{s_Si} i_{0_Si}(\theta_{Si}, T)} \right) \quad \dots (5)$$

$$45 \quad \eta_{gra} = \frac{2RT}{\beta_{gra} F} \sinh^{-1} \left(\frac{\beta_{gra} I_{gra}}{2L_2 a_{s_gra} i_{0_gra}(\theta_{gra}, T)} \right) \quad \dots (6)$$

[0080] Модуль 131 вычисления распределения концентраций принимает коэффициент D_{s1} диффузии лития в частице 1 положительного электрода из модуля 110 задания параметров. Модуль 131 вычисления распределения концентраций вычисляет распределение концентраций лития в частице 1 положительного электрода посредством решения выражения (7), описанного ниже в качестве уравнения диффузии системы полярных координат, трактующего активное вещество положительного электрода (частицу 1 положительного электрода) в качестве сферы на основе развития во времени. Поскольку величина изменения концентрации лития на поверхности (позиционируют $r_1=R_1$) частицы 1 положительного электрода является пропорциональной полному току I_T , граничное условие уравнения диффузии (7) задается в качестве выражения (8).

$$\frac{\partial c_{s1}(r_1)}{\partial t} = \frac{1}{r_1^2} \frac{\partial}{\partial r_1} \left(r_1^2 D_{s1}(\theta_1) \frac{\partial c_{s1}(r_1)}{\partial r_1} \right) \quad \dots (7)$$

$$-D_{s1} \frac{\partial c_{s1}}{\partial r_1} \Big|_{r_1=R_1} = \frac{I_T}{L_1 a_{s1} F} \quad \dots (8)$$

[0081] В отношении графитовой частицы 22, аналогично, модуль 131 вычисления распределения концентраций вычисляет распределение концентраций лития в графитовой частице 22 посредством решения выражения (9) при граничном условии, показанном в выражении (10), описанном ниже, на основе развития во времени.

$$\frac{\partial c_{s_gra}(r_{gra})}{\partial t} = \frac{1}{r_{gra}^2} \frac{\partial}{\partial r_{gra}} \left(r_{gra}^2 D_{s_gra}(\theta_{gra}) \frac{\partial c_{s_gra}(r_{gra})}{\partial r_{gra}} \right) \quad \dots (9)$$

$$-D_{s_gra} \frac{\partial c_{s_gra}(r_{gra})}{\partial r_{gra}} \Big|_{r_{gra}=R_{gra}} = \frac{-I_{gra}}{L_2 a_{s_gra} F} \quad \dots (10)$$

[0082] Уравнение диффузии системы полярных координат относительно кремниевой частицы 21 представляется как выражение (11). Выражение (11) отличается от уравнений диффузии (выражений (7) и (9)) относительно двух других частиц (частицы 1 положительного электрода и графитовой частицы 22) тем, что диффузионный член для учета диффузии лития в кремниевой частице 21 вследствие поверхностного механического напряжения σ_{surf} включен во второй член в правой стороне.

$$\frac{\partial c_{s_Si}(r)}{\partial t} = \nabla \cdot D_{s_Si} \left(\nabla c_{s_Si}(r) - \frac{\Omega c_{s_Si}(r)}{RT} \nabla \sigma_h(r) \right) \quad \dots (11)$$

[0083] Подробнее, диффузионный член, получающийся в результате поверхностного механического напряжения σ_{sur} , представляется как выражение (12) с использованием гидростатического механического напряжения $\sigma_h(r)$ кремниевой частицы 21 в электролите. В выражении (12), предполагается, что активное вещество отрицательного электрода (в модели батареи, кремниевая частица 21) не деформируется пластически, модуль Юнга и коэффициент Пуассона кремниевой частицы 21 в диапазоне пределов упругости представляются посредством E и ν , соответственно. Полное механическое напряжение, прикладываемое к кремниевой частице 21 из периферийного элемента, представляется посредством F_{ex} .

$$\sigma_h(r) = \frac{2\Omega E}{9(1-\nu)} (c_{s_Si_ave} - c_{s_Si}(r)) + F_{ex} \quad \dots (12)$$

[0084] В случае если выражение (12), представляющее гидростатическое механическое напряжение $\sigma_h(r)$, подставляется в выражение (11) в качестве уравнения диффузии, выражение (11) модифицируется следующим образом (см. выражение (13), описанное ниже).

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_{s_Si}(r)}{\partial t} &= \nabla \cdot D_{s_Si} \left[\nabla c_{s_Si}(r) - \frac{\Omega c_{s_Si}(r)}{RT} \nabla \left(\frac{2\Omega E}{9(1-\nu)} (c_{s_Si_ave} - c_{s_Si}(r)) + F_{ex} \right) \right] \\ &= \nabla \cdot D_{s_Si} \left(1 + \frac{2\Omega^2 E c_{s_Si}(r)}{9RT(1-\nu)} \right) \nabla c_{s_Si}(r) \quad \dots (13) \end{aligned}$$

[0085] Выражение (13) деформируется в качестве выражения (15), описанного ниже, с использованием эффективного коэффициента $D_{s_Si}^{eff}$ диффузии, который должен задаваться посредством выражения (14). Поскольку эффективный коэффициент $D_{s_Si}^{eff}$ диффузии имеет положительное значение, из выражения (15) следует понимать, что поверхностное механическое напряжение σ_{surf} прикладывается в направлении промотирования диффузии лития в кремниевой частице 21. Также следует понимать, что влияние поверхностного механического напряжения σ_{surf} определяется согласно концентрации c_{s_Si} лития в каждой точке (в каждой точке решетки, в которой вычисляется уравнение диффузии) в кремниевой частице 21.

$$D_{s_Si}^{eff} = D_{s_Si} \left(1 + \frac{2\Omega^2 E c_{s_Si}(r)}{9RT(1-\nu)} \right) \quad \dots (14)$$

$$\frac{\partial c_{s_Si}(r)}{\partial t} = \nabla \cdot D_{s_Si}^{eff} \nabla c_{s_Si}(r) \quad \dots (15)$$

[0086] Граничное условие уравнения диффузии (выражение (14)) представляется таким образом, что оно дополнительно включает в себя член в зависимости от гидростатического механического напряжения $\sigma_h(r)$ в качестве выражения (16), описанного ниже по сравнению с граничными условиями (см. выражения (8) и (10)) относительно двух других частиц (частицы 1 положительного электрода и графитовой частицы 22).

$$- D_{s_Si} \left(\nabla c_{s_Si}(r) - \frac{\Omega c_{s_Si}(r)}{RT} \nabla \sigma_h(r) \right) \Big|_{r=surf} = \frac{-I_{Si}}{L_2 a_{s_Si} F} \quad \dots (16)$$

[0087] Таким образом, модуль 131 вычисления распределения концентраций вычисляет распределения концентраций лития в трех частицах (в частице 1 положительного электрода, кремниевой частице 21 и графитовой частице 22). Вычисленные распределения концентраций лития выводятся в модуль 132 вычисления количества лития.

[0088] Модуль 132 вычисления количества лития принимает распределения (c_{s1} , c_{s_Si} , c_{s_gra}) концентраций лития в трех частицах из модуля 131 вычисления распределения концентраций, вычисляет различные количества лития и выводит количества лития в

другие функциональные блоки.

[0089] В частности, модуль 132 вычисления количества лития вычисляет поверхностное количество θ_{1_surf} лития частицы 1 положительного электрода на основе распределения c_{s1} концентраций лития частицы 1 положительного электрода (см. выражение (2)). Аналогично, модуль 132 вычисления количества лития вычисляет поверхностное количество θ_{Si_surf} лития для кремниевой частицы 21 на основе распределения c_{s_Si} концентраций лития для кремниевой частицы 21 и вычисляет поверхностное количество θ_{gra_surf} лития для графитовой частицы 22 на основе распределения c_{s_gra} концентраций лития для графитовой частицы 22. Вычисленные поверхностные количества θ_{1_surf} , θ_{Si_surf} , θ_{gra_surf} лития выводятся в модуль 135 вычисления потенциала разомкнутой цепи.

[0090] Модуль 132 вычисления количества лития вычисляет среднее количество θ_{1_ave} лития на основе распределения c_{s1} концентраций лития частицы 1 положительного электрода согласно выражению (3). Аналогично, модуль 132 вычисления количества лития вычисляет среднее количество θ_{Si_ave} лития для кремниевой частицы 21 на основе распределения c_{s_Si} концентраций лития для кремниевой частицы 21 и вычисляет среднее количество θ_{gra_ave} лития для графитовой частицы 22 на основе распределения c_{s_gra} концентраций лития для графитовой частицы 22. Вычисленное среднее количество θ_{Si_ave} лития выводится в модуль 133 вычисления поверхностного механического напряжения.

[0091] Модуль 133 вычисления поверхностного механического напряжения вычисляет поверхностное механическое напряжение σ_{surf} на основе среднего количества θ_{Si_ave} лития из модуля 132 вычисления количества лития. Ниже подробно описывается способ вычисления поверхностного механического напряжения σ_{surf} . Вычисленное поверхностное механическое напряжение σ_{surf} выводится в модуль 134 вычисления величины изменения потенциала разомкнутой цепи. Вычисленное полное механическое напряжение F_{ex} выводится в модуль 131 вычисления распределения концентраций.

[0092] Модуль 134 вычисления величины изменения потенциала разомкнутой цепи вычисляет величину ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи на основе поверхностного механического напряжения σ_{surf} из модуля 133 вычисления поверхностного механического напряжения. Величина ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи представляет собой величину изменения потенциала разомкнутой цепи кремниевой частицы 21 вследствие поверхностного механического напряжения σ_{surf} . В случае если состояние, в котором не формируется поверхностное механическое напряжение σ_{surf} , упоминается как "идеальное состояние", и потенциал разомкнутой цепи кремниевой частицы 21 в идеальном состоянии упоминается как "идеальный потенциал U_{Si_sta} разомкнутой цепи", величина ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи заменяется на величину отклонения потенциала разомкнутой цепи кремниевой частицы 21 вследствие поверхностного механического напряжения σ_{surf} на основе идеального потенциала U_{Si_sta} разомкнутой цепи. Величина ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи вычисляется из поверхностного механического напряжения σ_{surf} согласно выражению (17) с использованием величины Ω изменения

объема соединения на основе кремния в расчете на моль лития и постоянной F Фарадея. Вычисленная величина ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи выводится в модуль 135 вычисления потенциала разомкнутой цепи.

$$5 \quad \Delta V_{stress} = \frac{\sigma_{surf} \Omega}{F} \quad \dots (17)$$

[0093] Модуль 135 вычисления потенциала разомкнутой цепи вычисляет потенциал U_1 разомкнутой цепи частицы 1 положительного электрода на основе поверхностного количества θ_{1_surf} лития частицы 1 положительного электрода из модуля 132 вычисления количества лития. Более конкретно, хотя частица 1 положительного электрода виртуально разделяется на области N в радиальном направлении, потенциал U_1 разомкнутой цепи частицы 1 положительного электрода определяется согласно локальному количеству θ_{1N} лития (поверхностному количеству θ_{1_surf} лития) на поверхности частицы 1 положительного электрода в качестве крайней внешней периферийной области N (см. выражение (18), описанное ниже). По этой причине, карта (не показана), указывающая взаимосвязь соответствия между потенциалом U_1 разомкнутой цепи и поверхностным количеством θ_{1_surf} лития, создается посредством предварительного эксперимента, за счет чего потенциал U_1 разомкнутой цепи может вычисляться из поверхностного количества θ_{1_surf} лития. В отношении графитовой частицы 22, аналогично, модуль 135 вычисления потенциала разомкнутой цепи вычисляет потенциал U_{gra} разомкнутой цепи из поверхностного количества θ_{gra_surf} лития для графитовой частицы 22 посредством обращения к заданной карте (не показана) (см. выражение (19), описанное ниже).

$$U_1 = U_1(\theta_{1_surf}) \quad \dots (18)$$

$$U_{gra} = U_{gra}(\theta_{gra_surf}) \quad \dots (19)$$

[0094] При вычислении потенциала U_{Si} разомкнутой цепи кремниевой частицы 21, учитывается влияние поверхностного механического напряжения σ_{surf} . Потенциал U_{Si} разомкнутой цепи вычисляется посредством суммирования величины ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи с потенциалом U_{Si_sta} разомкнутой цепи кремниевой частицы 21 в состоянии, в котором поверхностное механическое напряжение σ_{surf} не формируется, как показано в выражении (20), описанном ниже. Потенциалы U_1 , U_{Si} , U_{gra} разомкнутой цепи, вычисленные согласно выражениям (18)-(20), выводятся в модуль 152 распределения тока.

$$40 \quad U_{Si} = U_{Si_sta}(\theta_{Si_surf}) + \Delta V_{stress} \quad \dots (20)$$

[0095] Концентрация c_e литиевой соли в электролите может изменяться с зарядом и разрядом батареи 4, и градиент концентрации литиевой соли в электролите может возникать. Когда это происходит, перенапряжение ΔV_e концентрации соли формируется между активным веществом положительного электрода (частицей 1 положительного электрода) и активным веществом отрицательного электрода (кремниевой частицей 21 и графитовой частицей 22) вследствие градиента концентрации литиевой соли и с большой вероятностью должно затрагивать потенциал V_1 положительного электрода

и потенциал V_2 отрицательного электрода.

[0096] Модуль 141 вычисления разности концентраций соли вычисляет разность Δc_e концентраций литиевой соли между активным веществом положительного электрода и активным веществом отрицательного электрода. Поскольку разность Δc_e концентраций литиевой соли зависит от коэффициента D_e диффузии электролита, объемной доли ε_e электролита, транспортного числа t_+^0 ионов лития и тока (полного тока I_T), например, разность Δc_e концентраций литиевой соли может вычисляться согласно выражениям (21)-(23), описанным ниже. Поскольку выражение (21) в качестве рекуррентного уравнения многократно решается в каждом заданном цикле вычисления в выражениях (21)-(23), цикл вычисления представляется посредством $\Delta\tau$. Параметр с присоединенным t на плече (в верхней правой стороне) указывает параметр во время настоящего вычисления, и параметр с присоединенным $(t-\Delta\tau)$ на плече указывает параметр во время предыдущего вычисления. Вычисленная разность Δc_e концентраций выводится в модуль 142 вычисления перенапряжения концентрации соли.

$$\Delta c_e^t = (1 - \alpha_e) \Delta c_e^{t-\Delta\tau} + \beta_e I_T \quad \dots (21)$$

$$\alpha_e = \frac{2\varepsilon_e^{0.5}}{L\Delta x} D_e \Delta\tau \quad \dots (22)$$

$$\beta_e = \frac{1-t_+^0}{F\varepsilon_e L} \Delta\tau \quad \dots (23)$$

[0097] Модуль 142 вычисления перенапряжения концентрации соли вычисляет перенапряжение ΔV_e концентрации соли из разности Δc_e концентраций литиевой соли, вычисленной посредством модуля 141 вычисления разности концентраций соли согласно выражению (24). Вычисленное перенапряжение ΔV_e концентрации соли выводится в модуль 152 распределения тока.

$$\Delta V_e = \frac{4RT(t_+^0 - 1)}{Fc_{e_ini}} \Delta c_e \quad \dots (24)$$

[0098] Модуль 151 определения условий сходимости и модуль 152 распределения тока выполняют вычислительную обработку с использованием итерационного способа для вычисления различных компонентов потенциала батареи 4. В варианте осуществления, используется закон Ньютона в качестве одного из характерных итерационных способов. Следует отметить, что вид итерационного способа не ограничен этим, может использоваться решение нелинейного уравнения, такое как способ деления пополам или способ на основе секущих.

[0099] При вычислении вышеописанных функциональных блоков, используются токи (I_T , I_{Si} , I_{gra}), протекающие в трех частях, заданных посредством модуля 152 распределения тока во время предыдущего вычисления. Модуль 151 определения условий сходимости принимает результат вычисления на основе токов, заданных во время предыдущего вычисления, из других функциональных блоков. Подробнее, модуль 151 определения условий сходимости принимает перенапряжение η_1 , η_{Si} , η_{gra} при реакции из модуля 122 вычисления перенапряжения при реакции (см. выражения (4)-(6)), принимает потенциалы U_1 , U_{Si} , U_{gra} разомкнутой цепи из модуля 135 вычисления

потенциала разомкнутой цепи (см. выражения (18)-(20)), принимает измеренное напряжение V_{meas} (измеренное значение напряжения батареи 4) из модуля 110 задания параметров и принимает перенапряжение ΔV_e концентрации соли из модуля 142 вычисления перенапряжения концентрации соли (см. выражение (24)). Модуль 151

определения условий сходимости (не показан) принимает сопротивление R_d постоянному току из модуля 110 задания параметров (ниже описываются подробности).
 [0100] Модуль 151 определения условий сходимости вычисляет напряжение батареи 4 из потенциала V_1 положительного электрода, потенциала V_2 отрицательного электрода, величины падения напряжения ($=I_T R_d$) вследствие сопротивления R_d постоянному току и перенапряжения ΔV_e концентрации соли согласно выражению отношения (25), описанному выше, которое должно устанавливаться между напряжением и током. Вычисленное напряжение описывается как "вычисленное напряжение V_{calc} ", чтобы отличать от измеренного напряжения V_{meas} (измеренного значения датчика 71 напряжения).

$$V_1 - V_2 - I_T R_d - \Delta V_e = V_{calc} \quad \dots (25)$$

[0101] В выражении (25), потенциал V_1 положительного электрода вычисляется посредством выражения (26). Потенциал V_2 отрицательного электрода вычисляется как равный потенциалу V_{Si} кремния, показанному в выражении (27), и потенциалу V_{gra} графита, показанному в выражении (28) ($V_2 = V_{Si} = V_{gra}$).

$$U_1 + \eta_1 = V_1 \quad \dots (26)$$

$$U_{Si} + \eta_{Si} = V_{Si} \quad \dots (27)$$

$$U_{gra} + \eta_{gra} = V_{gra} \quad \dots (28)$$

[0102] Затем модуль 151 определения условий сходимости определяет то, удовлетворяется или нет условие сходимости итерационного способа, посредством сравнения вычисленного напряжения V_{calc} с измеренным напряжением V_{meas} и сравнения потенциала V_{Si} кремния с потенциалом V_{gra} графита. В частности, модуль 151 определения условий сходимости определяет то, практически совпадают или нет вычисленное напряжение V_{calc} и измеренное напряжение V_{meas} друг с другом (ошибка между этими напряжениями меньше первого заданного значения PD1), и практически совпадают или нет потенциал V_{Si} кремния и потенциал V_{gra} графита друг с другом (ошибка между этими напряжениями меньше второго заданного значения PD2). В случае, если ошибка ($=|V_{calc} - V_{meas}|$) между вычисленным напряжением V_{calc} и измеренным напряжением V_{meas} равна или выше первого заданного значения PD1, или в случае, если ошибка ($=|V_{Si} - V_{gra}|$) между потенциалом V_{Si} кремния и потенциалом V_{gra} графита равна или выше второго заданного значения PD2, модуль 151 определения условий сходимости выводит, в модуль 152 распределения тока, результат определения того, что условие сходимости итерационного способа не удовлетворяется.

[0103] В случае если результат определения в отношении того, что условие сходимости не удовлетворяется, принимается из модуля 151 определения условий сходимости, модуль 152 распределения тока обновляет токи (I_T , I_{Si} , I_{gra}), протекающие в трех частицах, на значения для использования во время следующего вычисления. Подробнее,

модуль 152 распределения тока задает ток I_{Si} кремния и полный ток I_T , которые должны использоваться во время следующего вычисления, из токов I_{Si} кремния и полных токов I_T , используемых во время предыдущего вычисления и во время настоящего вычисления, с использованием алгоритма на основе закона Ньютона (или способа деления пополам, способа на основе секущих и т.п.). Оставшийся ток I_{gra} графита вычисляется из тока I_{Si} кремния и полного тока I_T согласно взаимосвязи между токами, показанной в выражении (29). Вычисленные токи выводятся в модуль 110 задания параметров. Затем значения тока после обновления используются во время следующего вычисления.

$$I_{Si} + I_{gra} = I_T \quad \dots (29)$$

[0104] Таким образом, модуль 151 определения условий сходимости и модуль 152 распределения тока выполняют вычислительную обработку итеративно до тех пор, пока ошибка между вычисленным напряжением V_{calc} и измеренным напряжением V_{meas} не станет меньше первого заданного значения PD1, и ошибка между потенциалом V_{Si} кремния и потенциалом V_{gra} графита не станет меньше второго заданного значения PD2. В случае если обе из двух ошибок становятся меньше соответствующих заданных значений (PD1, PD2), выполняется определение в отношении того, что итеративная вычислительная обработка сходится, и модуль 151 определения условий сходимости выводит параметры (потенциал U_1 разомкнутой цепи положительного электрода, поверхностное количество θ_{i_surf} лития и величину ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи), необходимые для оценки SOC, в модуль 160 оценки SOC.

[0105] Модуль 160 оценки SOC оценивает SOC батареи 4 на основе различных количеств (θ_{1_ave} , θ_{1_SOC0} , θ_{1_SOC100}) лития частицы 1 положительного электрода. Ниже описывается способ оценки SOC.

Вычисление поверхностного механического напряжения

[0106] Далее подробно описывается способ вычисления поверхностного механического напряжения σ_{surf} активного вещества из кремния. В нижеприведенном описании, состояние, представленное на характеристической схеме зависимости количества лития в кремниевом веществе от потенциала разомкнутой цепи отрицательного электрода в качестве комбинации (θ_{Si} , U_{Si}) количества θ_{Si} лития (например, среднего количества θ_{Si_ave} лития) кремниевом веществе и потенциала U_{Si} разомкнутой цепи кремниевом веществе, описывается как "состояние P". В частности, состояние P во время m-го (m является натуральным числом) вычисления представляется как "P(m)". В варианте осуществления, поверхностное механическое напряжение σ_{surf} вычисляется с акцентированием внимания на переходе состояния P.

[0107] Фиг. 10А-10Е являются концептуальными схемами, иллюстрирующими переход состояния P батареи на характеристической схеме зависимости количества лития на поверхности в кремниевом отрицательном электроде от потенциала разомкнутой цепи кремниевом отрицательного электрода. На фиг. 10А, показан пример, в котором состояние P(m) проиллюстрировано на зарядной кривой (указываемой посредством пунктирной линии).

[0108] В случае если заряд продолжается из состояния P(m), состояние P(m+1) в (m+1)-ом цикле вычисления поддерживается на зарядной кривой, как показано на фиг. 10В.

[0109] В случае если разряд выполняется из состояния P(m), показанного на фиг. 10А, как показано на фиг. 10С, состояние P(m+1) в (m+1)-ом цикле вычисления

отклоняется от зарядной кривой и проиллюстрировано в области между зарядной кривой и разрядной кривой (указываемой посредством штрихпунктирной линии с одной точкой). В случае если разряд продолжается, например, в (m+2)-ом цикле вычисления, состояние P(m+2) достигает разрядной кривой (см. фиг. 10D). В случае если разряд
5 продолжается после этого, состояние P(m+3) поддерживается на разрядной кривой (см. фиг. 10E).

[0110] Фиг. 11 является графиком, иллюстрирующим способ вычисления поверхностного механического напряжения σ_{surf} активного вещества из кремния. На
10 фиг. 11, пример, в котором заряд и разряд выполняется в порядке состояний P(1)-P(8).

[0111] Подробнее, во-первых, разряд начинается из состояния P(1) на разрядной кривой, и разряд продолжается до состояния P(3). Состояния P(2), P(3) поддерживаются на разрядной кривой. Затем в состоянии P(3), выполняется переключение с разряда на заряд. Состояния P(4), P(5) после заряда начинают переход в области между зарядной кривой и разрядной кривой. После этого, состояние P(6) проиллюстрировано на
15 зарядной кривой. Хотя заряд дополнительно продолжается, состояние P поддерживается на зарядной кривой (см. состояния P(7), P(8)).

[0112] В состояниях P(1)-P(3), которые проиллюстрированы на разрядной кривой, поверхностное механическое напряжение σ_{surf} переходит через предел текучести и равно
20 пределу σ_{ten} текучести при растяжении, как показано в выражении (30), описанном ниже.

$$\sigma_{surf} = \sigma_{ten} \quad \dots (30)$$

[0113] В состояниях P(6)-P(8) на зарядной кривой, поверхностное механическое напряжение σ_{surf} переходит через предел текучести при пределе σ_{com} текучести при
25 сжатии (см. выражение (31), описанное ниже).

$$\sigma_{surf} = \sigma_{com} \quad \dots (31)$$

[0114] Напротив, в случае если состояние P не иллюстрируется на зарядной кривой и разрядной кривой, т.е. в случае, если состояние P проиллюстрировано в области между
30 зарядной кривой и разрядной кривой (см. состояния P(4), P(5)), то, как вычислять поверхностное механическое напряжение σ_{surf} , становится проблемой. В варианте осуществления, средняя концентрация c_{Si_ave} лития в частице 21 кремния, когда направление заряда или разряда переключается, и поверхностное механическое
35 напряжение σ_{surf} в это время используется при вычислении поверхностного механического напряжения σ_{surf} в области. В нижеприведенном описании, средняя концентрация c_{Si_ave} лития в состоянии P, когда направление заряда или разряда переключается, описывается как "опорная концентрация c_{REF} лития", и поверхностное
40 механическое напряжение σ_{surf} в состоянии P описывается как "опорное поверхностное механическое напряжение σ_{REF} ".

[0115] В примере, показанном на фиг. 11, состояние P, когда заряд или разряд переключается, представляет собой состояние P(3) во время переключения с разряда на заряд. При вычислении состояний P(4), P(5) средняя концентрация c_{Si_ave} лития во
45 время состояния P(3) уже вычислена посредством выражений (8)-(10), описанных выше. Соответственно, средняя концентрация c_{Si_ave} лития, вычисленная в состоянии P(3), становится опорной концентрацией c_{REF} лития. Опорное поверхностное механическое

напряжение σ_{REF} в состоянии P(3) представляет собой предел σ_{ten} текучести при растяжении (см. выражение (30), описанное выше).

[0116] В состоянии P в области между зарядной кривой и разрядной кривой, имеется линейная взаимосвязь, представленная в качестве выражения (32), описанного ниже, между разностью $(c_{s2_ave} - c_{REF})$ концентраций лития, полученной посредством вычитания опорной концентрации c_{REF} лития из средней концентрации c_{Si_ave} лития, и поверхностным механическим напряжением σ_{surf} .

$$\sigma_{surf} = -\alpha_c (c_{Si_ave} - c_{REF}) + \sigma_{REF} \quad \dots (32)$$

[0117] Следует понимать, что линейная взаимосвязь представляет то, что величина изменения поверхностного механического напряжения σ_{surf} является пропорциональной величине изменения содержания лития в частице 21 кремния (количеству лития, внедренного в частицу 21 кремния, или количеству лития, десорбированного из частицы 21 кремния) в случае, если состояние P, когда направление заряда или разряда переключается, используется в качестве опорного.

[0118] Пропорциональная константа α_c представляет собой параметр, который определяется согласно механическим характеристикам соединения на основе кремния в качестве одного из активного вещества отрицательного электрода и периферийного элемента и может получаться посредством эксперимента. Подробнее, пропорциональная константа α_c может изменяться согласно температуре (\cong температуре ТВ батареи 4) активного вещества отрицательного элкремнияэлектрода и содержанию лития (средней концентрации c_{Si_ave} лития) в активном веществе отрицательного электрода. По этой причине, пропорциональная константа α_c получается для различных комбинаций температуры ТВ и средней концентрации c_{Si_ave} лития, и подготавливается карта (или выражение отношения), указывающая корреляционную взаимосвязь температуры ТВ, средней концентрации c_{Si_ave} лития и пропорциональной константы α_c . Карта, указывающая корреляционную взаимосвязь между одной из температуры ТВ и средней концентрацией c_{Si_ave} лития и пропорциональной константой α_c , может подготавливаться.

[0119] Поскольку концентрация лития и количество лития могут заменяться в качестве выражения (2), описанного выше, выражение (32), описанное выше, может модифицироваться в качестве выражения (33), описанного ниже, с использованием среднего количества θ_{Si_ave} лития частицы 21 кремния.

$$\sigma_{surf} = -\alpha_\theta (\theta_{Si_ave} - \theta_{REF}) + \sigma_{REF} \quad \dots (33)$$

[0120] Карта, указывающая корреляционную взаимосвязь температуры ТВ и среднего количества θ_{Si_ave} лития, и пропорциональная константа α_c (или пропорциональная константа α_θ) подготавливается и сохраняется заранее в запоминающем устройстве 100В ECU 100. По этой причине, пропорциональная константа α_c может вычисляться из температуры ТВ (измеренного значения температурного датчика 72) и среднего количества θ_{Si_ave} лития (оцененного значения во время предыдущего вычисления) посредством обращения к карте. Затем поверхностное механическое напряжение σ_{surf} в вышеописанной области может вычисляться посредством подстановки пропорциональной константы α_c , среднего количества θ_{Si_ave} лития, опорного

количества θ_{REF} лития и опорного поверхностного механического напряжения σ_{REF} в выражение (33), описанное выше. В дальнейшем подробно описывается последовательность операций вычисления поверхностного механического напряжения σ_{surf} со ссылкой на фиг. 14.

5 Последовательность операций оценки SOC

[0121] Фиг. 12 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей последовательность обработки для оценки SOC батареи 4 в варианте 1 осуществления. Блок-схемы последовательности операций способа, показанные на 10 фиг. 12 и фиг. 17 и 16, описанных ниже, вызываются из основной процедуры (не показана), например, каждый раз, когда заданный цикл истек, и многократно выполняются посредством ECU 100. Хотя этапы (в дальнейшем в этом документе, сокращаются как "S"), включенные в блок-схемы последовательности операций способа, по существу, реализуются через программную обработку в ECU 100, этапы могут 15 реализовываться посредством специализированных аппаратных средств (электрической схемы), изготовленных в ECU 100.

[0122] Ссылаясь на фиг. 12, обработка по S101-S106, описанная ниже, соответствует обработке вычисления потенциала одного электрода согласно варианту 1 20 осуществления. Во-первых, на S101, ECU 100 получает напряжение VB батареи 4 из датчика 71 напряжения и получает температуру TB батареи 4 из температурного датчика 72. Напряжение VB используется в качестве измеренного напряжения V_{meas} , и температура TB преобразуется в абсолютную температуру T. Абсолютная температура T может вычисляться из температуры TB в данный момент времени (во время 25 настоящего вычисления) или может вычисляться из среднего взвешенного температуры TB в прошлый заданный период (например, в течение 30 минут), определенный заранее.

[0123] На S102, ECU 100 вычисляет плотность i_{0_1} обменного тока частицы 1 30 положительного электрода. Как описано со ссылкой на фиг. 9, плотность i_{0_1} обменного тока зависит от поверхностного количества θ_{1_surf} лития частицы 1 положительного электрода и абсолютной температуры T. Соответственно, ECU 100 вычисляет плотность i_{0_1} обменного тока из поверхностного количества θ_{1_surf} лития (см. S303 по фиг. 13), вычисленного во время предыдущего вычисления, и абсолютной температуры T 35 посредством обращения к карте (не показана), указывающей взаимосвязь соответствия плотности i_{0_1} обменного тока, поверхностного количества θ_{1_surf} лития и абсолютной температуры T. Аналогично, ECU 100 вычисляет плотность i_{0_Si} обменного тока кремниевой частицы 21 и плотность i_{0_gra} обменного тока графитовой частицы 22 40 посредством обращения к соответствующим картам (не показаны).

[0124] На S103, ECU 100 вычисляет сопротивление Rd постоянному току батареи 4. 45 Сопротивление Rd постоянному току представляет собой резистивный компонент, когда ионы лития и электроны перемещаются между активным веществом положительного электрода и активным веществом отрицательного электрода, или резистивный компонент металлического фрагмента. Сопротивление Rd постоянному току имеет характеристику, которая изменяется в зависимости от абсолютной температуры T и количества θ_1 . Соответственно, сопротивление Rd постоянному току 45 может вычисляться из абсолютной температуры T посредством подготовки карты (не показана), указывающей взаимосвязь соответствия между сопротивлением Rd постоянному току и абсолютной температурой T заранее, на основе результата измерений сопротивления Rd постоянному току при каждой температуре.

[0125] На S104, ECU 100 вычисляет разность Δ_{ce} концентраций литиевой соли между активным веществом положительного электрода и активным веществом отрицательного электрода в электролите (см. выражения (21)-(23), описанные выше). Помимо этого, ECU 100 вычисляет перенапряжение ΔV_e концентрации соли из разности Δ_{ce}

концентраций литиевой соли согласно выражению (24), описанному выше (S105). Эти виды обработки подробно описываются со ссылкой на фиг. 9, и в силу этого описание не повторяется.

[0126] На S106, ECU 100 выполняет обработку вычисления сходимости для распределения тока (полного тока I_T), протекающего в активном веществе отрицательного электрода в трехчастичной модели, на ток (ток I_{Si} кремния), протекающий в кремниевой частице 21, и ток (ток I_{gra} графита), протекающий в графитовой частице 22.

[0127] На S200, ECU 100 оценивает SOC батареи 4 на основе результата обработки вычисления потенциала (обработки оценки SOC). Ниже описывается обработка оценки SOC.

[0128] Фиг. 13 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей обработку вычисления сходимости (обработку по S106 по фиг. 12) в варианте 1 осуществления. Ссылаясь на фиг. 13, на S301, ECU 100 вычисляет перенапряжение η_1 при реакции частицы 1 положительного электрода из плотности i_{0_1} обменного тока частицы 1 положительного электрода и абсолютной температуры T согласно выражению (4), описанному выше. Кроме того, ECU 100 вычисляет перенапряжение η_{Si} при реакции кремниевой частицы 21 из плотности i_{0_Si} обменного тока кремниевой частицы 21 и абсолютной температуры T согласно выражению (5), описанному выше, и вычисляет перенапряжение η_{gra} при реакции графитовой частицы 22 из плотности i_{0_gra} обменного тока графитовой частицы 22 и абсолютной температуры T согласно выражению (6), описанному выше.

[0129] На S302, в отношении частицы 1 положительного электрода, ECU 100 вычисляет распределение концентраций лития в частице 1 положительного электрода посредством подстановки коэффициента D_{s1} диффузии лития в частице 1 положительного электрода в выражение (7), описанное выше в качестве уравнения диффузии, и решения выражения (7) при граничном условии (см. выражение (8), описанное выше), определенном согласно полному току I_T . Коэффициент D_{s1} диффузии зависит от количества θ_1 лития частицы 1 положительного электрода и абсолютной температуры T . Таким образом, коэффициент D_{s1} диффузии может вычисляться из количества θ_1 лития во время предыдущего вычисления и абсолютной температуры T с использованием карты (не показана), подготовленной заранее.

[0130] В отношении графитовой частицы 22, аналогично, ECU 100 вычисляет распределение концентраций лития в графитовой частице 22 посредством решения уравнения диффузии (9) при граничном условии (см. выражение (10), описанное выше). Помимо этого, ECU 100 вычисляет распределение концентраций лития в кремниевой частице 21 посредством решения уравнения диффузии (15), в которое подставляется эффективный коэффициент $D_{s_Si}^{eff}$ диффузии (см. выражение (14)), при граничном условии (см. выражение (16)).

[0131] На S303, ECU 100 вычисляет поверхностное количество θ_{1_surf} лития частицы 1 положительного электрода на основе распределения концентраций лития в частице

1 положительного электрода, вычисленного на S302 (см. выражение (2), описанное выше). Аналогично, ECU 100 вычисляет поверхностное количество θ_{Si_surf} лития для кремниевой частицы 21 и вычисляет поверхностное количество θ_{gra_surf} лития для графитовой частицы 22.

5 [0132] На S304, ECU 100 вычисляет потенциал U_1 разомкнутой цепи из поверхностного количества θ_{1_surf} лития, вычисленного на S303, посредством обращения к карте (не показана), указывающей взаимосвязь соответствия между потенциалом U_1 разомкнутой цепи и количеством θ_1 лития частицы 1 положительного электрода (см. выражение 10 (18)). Аналогично, ECU 100 вычисляет потенциал U_{gra} разомкнутой цепи из поверхностного количества θ_{gra_surf} лития посредством обращения к карте (не показана), указывающей взаимосвязь соответствия между потенциалом U_{gra} разомкнутой цепи и количеством θ_{gra} лития для графитовой частицы 22 (см. выражение (19)).

15 [0133] На S305, ECU 100 вычисляет потенциал U_{Si_sta} разомкнутой цепи из поверхностного количества θ_{Si_surf} лития посредством обращения к карте (не показана), указывающей взаимосвязь соответствия между потенциалом U_{Si} разомкнутой цепи и количеством θ_{Si} лития для кремниевой частицы 21 в идеальном состоянии, в котором 20 поверхностное механическое напряжение $\sigma_{surf}=0$.

[0134] На S306, ECU 100 выполняет обработку вычисления поверхностного механического напряжения кремниевой частицы 21 для вычисления поверхностного механического напряжения σ_{surf} .

25 [0135] Фиг. 14 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей обработку вычисления поверхностного механического напряжения кремниевой частицы 21 (обработку по S306 по фиг. 13). Ссылаясь на фиг. 14, на S401, ECU 100 вычисляет среднее количество θ_{Si_ave} лития в кремниевой частице 21. Среднее количество θ_{Si_ave} лития может вычисляться идентично выражению (3), описанному 30 выше относительно частицы 1 положительного электрода.

[0136] На S402, ECU 100 считывает опорное количество θ_{REF} лития и опорное поверхностное механическое напряжение σ_{REF} , сохраненные в запоминающем устройстве 100В до предыдущего вычисления (см. обработку по S413, описанную ниже).

35 [0137] На S403, ECU 100 вычисляет пропорциональную константу α_θ из температуры ТВ батареи 4 и средней концентрации c_{Si_ave} лития (c_{Si_ave} во время предыдущего вычисления) посредством обращения к карте (не показана). Пропорциональная константа α_θ может вычисляться (моделирующе прогнозироваться) из физических 40 свойств (модуля Юнга и т.п.) активного вещества отрицательного электрода и периферийного элемента. Следует отметить, что пропорциональная константа α_θ не должна обязательно быть переменной, и фиксированное значение, определенное заранее, может использоваться в качестве пропорциональной константы α_θ .

45 [0138] На S404, ECU 100 вычисляет поверхностное механическое напряжение σ_{surf} из пропорциональной константы α_θ и среднего количества θ_{Si_ave} лития согласно выражению (33), описанному выше. Поверхностное механическое напряжение σ_{surf} ориентировочно вычисляется без учета текучести активного вещества из кремния и поверхностного механического напряжения σ_{surf} с учетом того, что текучесть вещества

из кремния определяется (главным образом вычисляется).

[0139] На S405, ECU 100 сравнивает поверхностное механическое напряжение σ_{surf} , ориентировочно вычисленное на S404, с пределом σ_{com} текучести при сжатии. В случае если поверхностное механическое напряжение σ_{surf} с учетом знака поверхностного механического напряжения σ_{surf} , показанного на фиг. 4, равен или меньше предела σ_{com} текучести при сжатии, т.е. в случае, если абсолютная величина поверхностного механического напряжения σ_{surf} равна или выше абсолютной величины предела σ_{com} текучести при сжатии (на S405, "Да"), ECU 100 определяет то, что активное вещество отрицательного электрода переходит через предел текучести, и то, что поверхностное механическое напряжение σ_{surf} равно пределу σ_{com} текучести при сжатии ($\sigma_{\text{surf}} = \sigma_{\text{com}}$) (S406). Таким образом, поверхностное механическое напряжение σ_{surf} , ориентировочно вычисленное на S404, не используется, и предел σ_{com} текучести при сжатии используется вместо этого. Затем ECU 100 обновляет опорное поверхностное механическое напряжение σ_{REF} посредством задания предела σ_{com} текучести при сжатии в качестве нового опорного поверхностного механического напряжения σ_{REF} . Помимо этого, ECU 100 обновляет опорное количество θ_{REF} лития посредством задания среднего количества $\theta_{\text{Si_ave}}$ лития, вычисленного на S401, в качестве опорного количества θ_{REF} лития (S407).

[0140] В случае если поверхностное механическое напряжение σ_{surf} с учетом знака превышает предел σ_{com} текучести при сжатии со знаком (в случае, если абсолютная величина поверхностного механического напряжения σ_{surf} меньше абсолютной величины предела σ_{com} текучести при сжатии) (на S405, "Нет"), ECU 100 переводит процесс на S408 и сравнивает поверхностное механическое напряжение σ_{surf} с пределом σ_{ten} текучести при растяжении.

[0141] В случае если поверхностное механическое напряжение σ_{surf} равно или выше предела σ_{ten} текучести при растяжении (на S408, "Да"), ECU 100 определяет то, что активное вещество отрицательного электрода переходит через предел текучести, и то, что поверхностное механическое напряжение σ_{surf} равно пределу σ_{ten} текучести при растяжении (S409). Затем ECU 100 обновляет опорное поверхностное механическое напряжение σ_{REF} с пределом σ_{ten} текучести при растяжении и обновляет опорное количество θ_{REF} лития со средним количеством $\theta_{\text{Si_ave}}$ лития, вычисленным на S401 (S410).

[0142] На S408, в случае если поверхностное механическое напряжение σ_{surf} меньше предела σ_{ten} текучести при растяжении (на S408, "Нет"), поверхностное механическое напряжение σ_{surf} находится в промежуточной области А между пределом σ_{com} текучести при сжатии и пределом σ_{ten} текучести при растяжении ($\sigma_{\text{com}} < \sigma_{\text{surf}} < \sigma_{\text{ten}}$), и активное вещество отрицательного электрода не переходит через предел текучести. Таким образом, поверхностное механическое напряжение σ_{surf} , ориентировочно вычисленное на S404, используется (S411). В этом случае, опорное поверхностное механическое напряжение σ_{REF} не обновляется, и поддерживается опорное поверхностное механическое напряжение σ_{REF} , заданное во время предыдущего вычисления (или во время вычисления перед предыдущим вычислением). Обновление опорного количества

θ_{REF} лития также не выполняется (S412).

[0143] В случае если одна из обработки S407, S410 и S412 выполняется, опорное количество θ_{REF} лития и опорное поверхностное механическое напряжение σ_{REF} сохраняются в запоминающем устройстве 100B (S413). После этого, процесс возвращается на S307 (см. фиг. 13) обработки вычисления сходимости.

[0144] Ссылаясь на фиг. 13 снова, на S307, ECU 100 вычисляет величину ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи из поверхностного механического напряжения σ_{surf} согласно выражению (17), чтобы учитывать влияние поверхностного механического напряжения σ_{surf} на потенциал U_{Si} разомкнутой цепи кремниевой частицы 21.

[0145] На S308, ECU 100 вычисляет сумму перенапряжения η_1 при реакции частицы 1 положительного электрода и потенциала U_1 разомкнутой цепи положительного электрода в качестве потенциала V_1 положительного электрода согласно выражению (26), описанному выше. Кроме того, ECU 100 вычисляет потенциал U_{Si} разомкнутой цепи кремния посредством суммирования величины ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи с идеальным потенциалом U_{Si_sta} разомкнутой цепи кремниевой частицы 21 (см. выражение (20), описанное выше), и дополнительно вычисляет сумму перенапряжения η_{Si} при реакции кремниевой частицы 21 и потенциала U_{Si} разомкнутой цепи кремния в качестве потенциала V_{Si} кремния (см. выражение (27), описанное выше). Помимо этого, ECU 100 вычисляет сумму перенапряжения η_{gra} при реакции графитовой частицы 22 и потенциала U_{gra} разомкнутой цепи графита в качестве потенциала V_{gra} графита (см. выражение (28), описанное выше).

[0146] На S309, ECU 100 вычисляет вычисленное напряжение V_{calc} из потенциала V_1 положительного электрода, потенциала V_2 отрицательного электрода (потенциала V_{Si} кремния или потенциала V_{gra} графита), величины падения напряжения ($=I_T R_d$) вследствие сопротивления R_d постоянному току и перенапряжения ΔV_e концентрации соли согласно выражению (25), описанному выше.

[0147] На S310, ECU 100 определяет то, устанавливается или нет условие (условие сходимости), при котором итеративное вычисление сходится при обработке вычисления сходимости. В частности, условие сходимости включает в себя первое и второе условия. Первое условие представляет собой условие относительно того, меньше или нет абсолютное значение ($=|V_{calc}-V_{meas}|$) разности между вычисленным напряжением V_{calc} , вычисленным на S309, и измеренным напряжением V_{meas} , полученным из датчика 71 напряжения на S101, первого заданного значения PD1 ($|V_{calc}-V_{meas}|<PD1$). Второе условие представляет собой условие относительно того, меньше или нет абсолютное значение ($=|V_{Si}-V_{gra}|$) разности между потенциалом V_{Si} кремния и потенциалом V_{gra} графита, вычисленным на S308, второго заданного значения PD2 ($|V_{Si}-V_{gra}|<PD2$).

[0148] ECU 100 определяет то, что условие сходимости устанавливается в случае, если оба из первого и второго условий устанавливаются, и определяет то, что условие сходимости не устанавливается в случае, если любое из первого и второго условий не устанавливается. В случае если условие сходимости не устанавливается (на S310, "Нет"), ECU 100 обновляет токи I_T , I_{Si} , I_{gra} согласно алгоритму на основе закона Ньютона (S311) и возвращает процесс на S301. В случае если условие сходимости устанавливается (на S310, "Да"), ECU 100 возвращает процесс на S200 по фиг. 12.

[0149] Ссылаясь на фиг. 12 снова, на S200, ECU 100 выполняет обработку оценки SOC для оценки SOC батареи 4 на основе результата обработки вычисления компонентов потенциала. Обработка оценки SOC включает в себя, например, обработку по S201 и S202.

5 [0150] На S201, ECU 100 получает среднее количество θ_{1_ave} лития (значение, вычисленное при обработке S302, при которой условие сходимости устанавливается) частицы 1 положительного электрода, и считывает известные количества θ_{1_SOC0} , θ_{1_SOC100} лития, сохраненные в запоминающем устройстве 100В. Количество θ_{1_SOC0} лития представляет собой количество лития частицы 1 положительного электрода, соответствующее SOC=0%, и количество θ_{1_SOC100} лития представляет собой количество лития частицы 1 положительного электрода, соответствующее SOC=100%.

10 [0151] Затем на S202, ECU 100 оценивает SOC батареи 4 на основе вышеописанных трех количеств лития. В частности, SOC батареи 4 может вычисляться с использованием выражения (34), описанного ниже.

$$SOC[\%] = \frac{\theta_{1_SOC0} - \theta_{1_ave}}{\theta_{1_SOC0} - \theta_{1_SOC100}} \times 100 \quad \dots (34)$$

15 [0152] Как описано выше, в варианте 1 осуществления, используется "трехчастичная модель". В трехчастичной модели, положительный электрод типично представляется посредством частицы 1 положительного электрода, и отрицательный электрод типично представляется посредством двух частиц из кремниевой частицы 21 и графитовой частицы 22. В таком случае, ток (ток I_{Si} кремния), протекающий в кремниевой частице 21, и ток (ток I_{gra} графита), протекающий в графитовой частице 22, отличаются друг от друга, и полный ток I_T , протекающий в активном веществе отрицательного электрода, распределяется на ток I_{Si} кремния и ток I_{gra} графита.

20 [0153] Таким образом, в варианте 1 осуществления, распределение тока между кремниевой частицей 21 и графитовой частицей 22 учитывается, за счет чего точность вычисления параметров в зависимости от тока повышается по сравнению со случаем, в котором распределение тока не учитывается. В частности, в варианте осуществления, перенапряжение η_{Si} кремния (см. выражение (5)), которое должно определяться согласно току I_{Si} кремния, и перенапряжение η_{gra} графита (см. выражение (6)), которое должно определяться согласно току I_{gra} графита, вычисляются отдельно. Вследствие этого, можно точно вычислять перенапряжение, которое формируется согласно реакции при переносе заряда (реакции внедрения и десорбции лития), по сравнению со случаем, в котором токи не различаются между собой.

25 [0154] Кроме того, повышается точность вычисления распределений концентраций лития в частицах, которые вычисляются посредством решения уравнений диффузии, показанных в выражениях (7)-(16). По этой причине, повышается точность вычисления средней концентрации $c_{s_Si_ave}$ лития (или среднего количества θ_{Si_ave} лития) в кремниевой частице 21. Соответственно, также повышается точность вычисления поверхностного механического напряжения σ_{surf} в зависимости от средней концентрации $c_{s_Si_ave}$ лития (или среднего количества θ_{Si_ave} лития) (см. выражение (32) или (33), описанное выше). Вследствие этого, можно вычислять величину ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи, указывающую величину отклонения потенциала разомкнутой цепи (потенциала U_{Si} разомкнутой цепи кремния) кремниевой частицы 21 вследствие поверхностного

механического напряжения σ_{surf} с высокой точностью (см. выражение (17)). Как результат, поскольку можно точно отражать влияние поверхностного механического напряжения σ_{surf} в потенциале U_2 разомкнутой цепи отрицательного электрода (см. выражение (20), описанное выше), также можно вычислять потенциал V_2 отрицательного электрода с высокой точностью. Помимо этого, также можно оценивать SOC батареи 4 с высокой точностью (обработка оценки SOC). Как описано выше, согласно варианту 1 осуществления, можно оценивать внутреннее состояние батареи 4 с высокой точностью.

Пример 1 модификации варианта 1 осуществления

[0155] В примере 1 модификации варианта 1 осуществления, описывается конфигурация, в которой обработка вычисления сходимости выполняется с учетом влияния электрического двойного слоя, который должен формироваться на поверхности активного вещества. В примере модификации, полный ток I_T дополнительно распределяется на компонент тока, предусмотренный при изготовлении лития (внедрении и десорбции ионов лития), и компонент тока, не предусмотренный при изготовлении лития. В частности, в отношении частицы 1 положительного электрода, в случае если ток, предусмотренный при изготовлении лития в полном токе I_T , описывается как "ток I_1^{EC} реакции", и ток, не предусмотренный при изготовлении лития, описывается как "ток I_1^C конденсатора", устанавливается выражение (35), описанное ниже.

$$I_T = I_1^{EC} + I_1^C \quad \dots (35)$$

[0156] Электростатическая емкость электрического двойного слоя, который должен формироваться в частице 1 положительного электрода, описывается как C_1 .

Электростатическая емкость C_1 известна посредством предварительной оценки. Ток I_1^C конденсатора представляется как выражение (36), описанное ниже.

$$I_1^C = -C_1 \frac{dV_1}{dt} \quad \dots (36)$$

[0157] Взаимосвязь, идентичная взаимосвязи выражения (26), описанного выше, устанавливается между потенциалом V_1 положительного электрода, потенциалом U_1 разомкнутой цепи положительного электрода и перенапряжением η_1 при реакции (см. выражение (37), описанное выше). Следует отметить, что в перенапряжении η_1 положительного электрода, как показано в выражении (38), описанном ниже, ток I_1^{EC} реакции используется вместо полного тока I_T .

$$V_1 = U_1 + \eta_1 \quad \dots (37)$$

$$\eta_1 = \frac{2RT}{\beta_1 F} \sinh^{-1} \left(\frac{-\beta_1 I_1^{EC}}{2L_1 a_{s-1} i_{0-1}(\theta_1, T)} \right) \quad \dots (38)$$

[0158] В отношении стороны отрицательного электрода, ток (ток I_{Si} кремния) протекающий в кремниевой частице 21, разбивается на ток I_{Si}^{EC} реакции и ток I_{Si}^C конденсатора. Кроме того, ток (ток I_{gra} графита), протекающий в графитовой частице

22, разбивается на ток I_{gra}^{EC} реакции и ток I_{gra}^C конденсатора. Затем выражение (39), описанное ниже, устанавливается между этими токами.

$$I_T = I_{Si}^{EC} + I_{Si}^C + I_{gra}^{EC} + I_{gra}^C \quad \dots (39)$$

[0159] Ток I_{Si}^C конденсатора представляется как выражение (40), описанное ниже, с помощью электростатической емкости C_{Si} , которая должна формироваться в кремниевой частице 21, и потенциала V_2 отрицательного электрода. Ток I_{gra}^C конденсатора представляется как выражение (41), описанное ниже, с помощью электростатической емкости C_{gra} , которая должна формироваться в графитовой частице 22, и потенциала V_2 отрицательного электрода.

$$I_{Si}^C = C_{Si} \frac{dV_2}{dt} \quad \dots (40)$$

$$I_{gra}^C = C_{gra} \frac{dV_2}{dt} \quad \dots (41)$$

[0160] Кроме того, устанавливается выражение (42), которое является идентичным выражениям (27) и (28), описанным выше. Здесь, ток I_{Si} кремния в перенапряжении η_{Si} кремния заменяется на ток I_{Si}^{EC} конденсатора, и ток I_{gra} графита в перенапряжении η_{gra} графита заменяется на ток I_{gra}^{EC} конденсатора (см. выражения (43) и (44), описанные ниже).

$$V_2 = U_{Si} + \eta_{Si} = U_{gra} + \eta_{gra} \quad \dots (42)$$

$$\eta_{Si} = \frac{2RT}{\beta_{Si} F} \sinh^{-1} \left(\frac{\beta_{Si} I_{Si}^{EC}}{2L_2 a_{s_Si} i_{0_Si}(\theta_{Si}, T)} \right) \quad \dots (43)$$

$$\eta_{gra} = \frac{2RT}{\beta_{gra} F} \sinh^{-1} \left(\frac{\beta_{gra} I_{gra}^{EC}}{2L_2 a_{s_gra} i_{0_gra}(\theta_{gra}, T)} \right) \quad \dots (44)$$

[0161] Как описано выше, в примере 1 модификации варианта 1 осуществления, ток (полный ток I_T), протекающий в частице 1 положительного электрода, разбивается на ток I_1^C конденсатора и ток I_1^{EC} реакции с учетом влияния электрического двойного слоя, который должен формироваться на поверхности активного вещества положительного электрода. В отношении стороны отрицательного электрода, аналогично, с учетом влияния электрического двойного слоя, который должен формироваться на поверхности активного вещества отрицательного электрода, ток I_{Si} кремния разбивается на ток I_{Si}^C конденсатора и ток I_{Si}^{EC} реакции, и ток I_{gra} графита разбивается на ток I_{gra}^C конденсатора и ток I_{gra}^{EC} реакции. После этого, при вычислении перенапряжений (η_1 , η_{Si} , η_{gra}) при реакции, используются соответствующие токи (I_T^{EC} , I_{Si}^{EC} , I_{gra}^{EC}) реакции. Таким образом, при вычислении перенапряжения при реакции в качестве напряжения, которое должно формироваться согласно реакции внедрения и десорбции лития, влияние компонента тока (тока конденсатора), не предусмотренного

во внедрении и десорбции лития, исключается только посредством заряда и разряда электрического двойного слоя. Вследствие этого, в то время как вычислительная нагрузка ECU 100 может увеличиваться, можно дополнительно повышать точность вычисления перенапряжения при реакции, по сравнению с вариантом 1 осуществления.

5 Пример 2 модификации варианта 1 осуществления

Изменение потенциала отрицательного электрода

[0162] В общем, в литий-ионной аккумуляторной батарее, известно, что
 10 производительность заряда и разряда или тепловое сопротивление аккумуляторной батареи с большой вероятностью должно ухудшаться вследствие "осаждения лития", при котором металлический литий осаждается на отрицательном электроде. В примере 2 модификации варианта 1 осуществления, данное ограничение применяется к входной мощности батареи (электрической мощности заряда в батарею 4), за счет чего выполняется "управление подавлением осаждения лития" для защиты батареи 4 от осаждения лития.

15 [0163] Фиг. 15 является концептуальной схемой, иллюстрирующей изменение потенциала V_2 отрицательного электрода, когда возникает осаждение лития. На фиг. 15, горизонтальная ось представляет истекшее время, и вертикальная ось представляет потенциал V_2 отрицательного электрода на основе металлического лития.

20 [0164] Как показано на фиг. 15, потенциал V_2 отрицательного электрода снижается во время заряда батареи 4. Чем больше электрическая мощность заряда в батарею 4, тем больше величина уменьшения потенциала V_2 отрицательного электрода. В случае если потенциал V_2 отрицательного электрода опускается ниже потенциала осаждения лития (0 В на основе металлического лития), осаждение лития может возникать.

25 Соответственно, в примере 2 модификации варианта 1 осуществления, электрическая мощность заряда в батарею 4 подавляется от момента, когда потенциал V_2 отрицательного электрода достигает заданного потенциала выше потенциала осаждения лития, так что не допускается то, что потенциал V_2 отрицательного электрода равен или меньше 0 В.

30 [0165] Как описано выше, в примере 2 модификации варианта 1 осуществления, поскольку можно вычислять потенциал V_2 отрицательного электрода с высокой точностью, можно надежно подавлять осаждение металлического лития на поверхности отрицательного электрода и надлежащим образом защищать батарею 4 даже в
 35 аккумуляторной системе, в которой возникает влияние гистерезиса.

Вариант 2 осуществления

[0166] В варианте 1 осуществления, описывается трехчастичная модель для
 40 вычисления различных компонентов потенциала батареи 4 с высокой точностью (см. фиг. 5 и 6). В варианте 2 осуществления, чтобы уменьшать вычислительную нагрузку и объем запоминающего устройства ECU 100, описывается конфигурация, в которой используется модель батареи, более упрощенная по сравнению с трехчастичной моделью. В модели батареи, как описано ниже, упрощаются выражения для вычисления перенапряжения (η_1 , η_{Si} , η_{gra}) при реакции, и уравнения диффузии упрощаются. Общая конфигурация системы аккумуляторной батареи согласно варианту 2 осуществления
 45 является идентичной общей конфигурации (см. фиг. 1) системы 10 аккумуляторной батареи согласно варианту 1 осуществления.

Упрощение трехчастичной модели

[0167] В отношении частицы 1 положительного электрода, уравнение диффузии

(выражение, идентичное выражению (7), описанному выше), показанное в выражении (45), описанном ниже, решается при граничном условии (см. выражение (8)), за счет чего вычисляется распределение концентраций лития в частице 1 положительного электрода. Затем поверхностное количество θ_{1_surf} лития частицы 1 положительного электрода вычисляется из распределения концентраций лития в частице 1 положительного электрода (см. выражение (2), описанное выше).

$$\frac{\partial c_{s-1}(r_1)}{\partial t} = \frac{1}{r_1^2} \frac{\partial}{\partial r_1} \left(r_1^2 D_{s-1}(\theta_1) \frac{\partial c_{s-1}(r_1)}{\partial r_1} \right) \quad \dots (45)$$

[0168] С другой стороны, в варианте 2 осуществления, диффузия лития в кремниевой частице 21 упрощается. То же применимо к графитовой частице 22 (уравнение диффузии относительно кремниевой частицы 21 и уравнения диффузии (см. выражения (9)-(16), описанные выше) графитовой частицы 22 опускаются). Другими словами, предполагается, что распределение концентраций лития для кремниевой частицы 21 является равномерным, и предполагается, что распределение концентраций лития для графитовой частицы 22 также является равномерным.

[0169] Как описано выше, потенциал разомкнутой цепи (потенциал U_{Si} разомкнутой цепи кремния) кремниевой частицы 21 определяется согласно поверхностному количеству θ_{Si_surf} лития для кремниевой частицы 21 (см. выражение (18), описанное выше). В случае если формулирование уравнения диффузии опускается при условии, что распределение концентраций лития для кремниевой частицы 21 является равномерным, то, как вычислять потенциал U_{Si} разомкнутой цепи кремния, становится проблемой.

[0170] В общем, концентрация лития в активном веществе положительного электрода и концентрация лития в активном веществе отрицательного электрода имеют такую взаимосвязь, что в случае если одна из концентраций лития увеличивается, другая концентрация лития снижается. В модели батареи варианта 2 осуществления, концентрация лития в активном веществе отрицательного электрода вычисляется из концентрации лития в активном веществе положительного электрода (количества θ_1 лития частицы 1 положительного электрода) с использованием взаимосвязи.

[0171] Подробно, в модели батареи варианта 2 осуществления, кремниевая частица 21 и графитовая частица 22 рассматриваются в качестве одной смешанной частицы 2 отрицательного электрода. Смешанная частица 2 отрицательного электрода виртуально не разделяется на множество областей в отличие от частицы 1 положительного электрода, и распределение концентраций лития в смешанной частице 2 отрицательного электрода не учитывается. По этой причине, поверхность смешанной частицы 2 отрицательного электрода и другие фрагменты (внутри смешанной частицы 2 отрицательного электрода) не различаются между собой, и значение, полученное посредством нормализации концентрации лития в смешанной частице 2 отрицательного электрода, описывается как количество θ_2 лития.

[0172] В случае если отношение (отношение емкости) касательно емкости частицы 1 положительного электрода к емкости смешанной частицы 2 отрицательного электрода описывается как θ_{gate} , отношение θ_{gate} емкости является фиксированным значением и может представляться как выражение (46), описанное ниже, с использованием количества θ_1 лития частицы 1 положительного электрода и количества θ_2 лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода. К значениям во время настоящего вычисления

присоединяется t в верхней правой стороне (на правом плече), и к значениям во время предыдущего вычисления присоединяется $t (t-\Delta t)$ в верхней правой стороне, за счет этого обеспечивая различие между значениями во время настоящего вычисления и значениями во время предыдущего вычисления.

$$\theta_{rate} = -\frac{\theta_2^t - \theta_2^{t-\Delta t}}{\theta_1^t - \theta_1^{t-\Delta t}} \quad \dots (46)$$

[0173] Затем, вычисляется количество θ_2^t лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода. Количество θ_2^t лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода может вычисляться с использованием количества θ_1^t лития частицы 1 положительного электрода и отношения θ_{rate} емкости согласно выражению (47), описанному ниже. В выражении (45) θ_{1_fix} является опорным значением количества θ_1 лития, и θ_{2_fix} является значением количества θ_2 лития, соответствующим опорному значению (θ_{1_fix}) θ_1 . Оба из этих значений получают посредством эксперимента.

$$\theta_2^t = \theta_{rate} \times (\theta_1^t - \theta_{1_fix}) + \theta_{2_fix} \quad \dots (47)$$

[0174] Таким образом, в то время как количество θ_2 лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода вычисляется из количества θ_1 лития частицы 1 положительного электрода, количество θ_2 лития также вычисляется с использованием другого способа, описанного ниже. Затем в случае, если результаты вычисления количества θ_2 лития двух способов вычисления совпадают друг с другом, предполагается, что результаты вычисления параметров определяются допустимыми. В дальнейшем в этом документе описывается другой способ вычисления количества θ_2 лития.

[0175] Поскольку кремниевая частица 21 и графитовая частица 22 имеют идентичный потенциал ($V_{Si}=V_{gra}$), выражение (48), описанное ниже, устанавливается (см. выражения (27) и выражение (28)).

$$U_{Si}(\theta_{Si}^t) + \eta_{Si} = U_{gra}(\theta_{gra}^t) + \eta_{gra} \quad \dots (48)$$

[0176] В варианте 2 осуществления, для упрощения, предполагается, что перенапряжение η_{Si} кремния и перенапряжение η_{gra} графита равны друг другу (см. выражение (49), описанное ниже).

$$\eta_{Si} = \eta_{gra} \quad \dots (49)$$

[0177] Затем выражение (48), описанное выше, упрощается в качестве выражения (50), описанного ниже.

$$U_{Si}(\theta_{Si}^t) = U_{gra}(\theta_{gra}^t) \quad \dots (50)$$

[0178] Потенциал U_{Si} разомкнутой цепи кремния в левой стороне выражения (50) представляется посредством суммы U_{Si_sta} в качестве потенциала разомкнутой цепи в случае, если поверхностное механическое напряжение $\sigma_{surf}=0$, и величины ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи вследствие поверхностного механического напряжения σ_{surf} (см. выражения (17) и (20)). Таким образом, выражение (50) дополнительно модифицируется в качестве выражения (51), описанного ниже.

$$U_{Si_sta} + \frac{\sigma_{surf}^t \Omega}{F} = U_{gra}(\theta_{gra}^t) \quad \dots (51)$$

[0179] Хотя второй элемент в левой стороне выражения (51) включает в себя
5 поверхностное механическое напряжение σ_{surf} , поверхностное механическое напряжение σ_{surf} вычисляется согласно выражению (52), описанному ниже, аналогично варианту 1 осуществления.

$$\sigma_{surf} = -\alpha_{\theta} (\theta_{Si_ave} - \theta_{REF}) + \sigma_{REF} \quad \dots (52)$$

[0180] Описание предоставлено в выражениях (30) и (31), и в силу этого подробное
10 описание не повторяется. С другой стороны, в случае если поверхностное механическое напряжение σ_{surf} переходит через предел текучести, поверхностное механическое напряжение σ_{surf} вычисляется посредством $\sigma_{surf} = \sigma_{com}$ или $\sigma_{surf} = \sigma_{ten}$ вместо выражения (52).
15

[0181] Количество θ_2^t лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода может
вычисляться посредством следующего способа без использования отношения θ_{rate}
емкости. Полный ток I_T вводится и выводится из смешанной частицы 2 отрицательного
20 электрода между предыдущим вычислением и настоящим вычислением (в то время как Δt истекает), за счет чего величина электричества смешанной частицы 2 отрицательного электрода изменяется посредством $I_T \cdot \Delta t$, и количество лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода изменяется с $\theta_2^{t-\Delta t}$ на θ_2^t . В отношении величины $(I_T \cdot \Delta t)$
25 изменения количества электричества смешанной частицы 2 отрицательного электрода и величины $(\theta_2^t - \theta_2^{t-\Delta t})$ изменения количества лития, как показано в выражении (53), описанном ниже, предусмотрено такое условие (условие сходимости), что величина $(I_T \cdot \Delta t)$ изменения и величина $(\theta_2^t - \theta_2^{t-\Delta t})$ изменения совпадают между собой. В левой
30 стороне выражения (53), используются объем Vol_2 смешанной частицы 2 отрицательного электрода, предельная концентрация $c_{Si,max}$ лития для кремниевой частицы 21 и предельная концентрация $c_{gra,max}$ лития для графитовой частицы 22.

$$\frac{I_T \Delta t}{Vol_2 F (c_{Si,max} + c_{gra,max})} = \theta_2^t - \theta_2^{t-\Delta t} \quad \dots (53)$$

[0182] Здесь, количество θ_2 лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода
представляется как выражение (54), описанное ниже, с использованием количества θ_{Si}
лития и предельной концентрации $c_{Si,max}$ лития для кремниевой частицы 21 и количества
40 θ_{gra} лития и предельной концентрации $c_{gra,max}$ лития для графитовой частицы 22. Выражение (55) извлекается посредством подстановки выражения (54) в выражение (52).

$$\theta_2^t = \frac{\theta_{Si}^t c_{Si,max} + \theta_{gra}^t c_{gra,max}}{c_{Si,max} + c_{gra,max}} \quad \dots (54)$$

$$\frac{I_T \Delta t}{Vol_2 F (c_{Si,max} + c_{gra,max})} = \frac{(\theta_{Si}^t - \theta_{Si}^{t-\Delta t}) c_{Si,max} + (\theta_{gra}^t - \theta_{gra}^{t-\Delta t}) c_{gra,max}}{c_{Si,max} + c_{gra,max}} \quad \dots (55)$$

[0183] Три параметра из количеств θ_{Si} , θ_{gra} лития и поверхностного механического напряжения σ_{surf} могут вычисляться посредством одновременного формулирования вышеописанных выражений. Затем количество θ_2 лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода, вычисленное из количества θ_{Si} лития для кремниевой частицы 21 и количества θ_{gra} лития для графитовой частицы 22 согласно выражению (54), сравнивается с количеством θ_2 лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода, вычисленным из количества θ_1 лития согласно выражению (47). В случае если количества θ_2 лития, вычисленные с использованием двух способов, хорошо совпадают друг с другом (в случае, если разность меньше заданного значения), предполагается, что результаты вычисления количеств θ_{Si} , θ_{gra} лития и поверхностного механического напряжения σ_{surf} используются (в отношении подробностей, см. блок-схему последовательности операций способа, описанную ниже).

Последовательность операций оценки SOC

[0184] Фиг. 16 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей последовательность обработки для оценки SOC батареи 4 в варианте 2 осуществления. Ссылаясь на фиг. 16, на S601, ECU 100 получает напряжение VB батареи 4 из датчика 71 напряжения. ECU 100 получает температуру ТВ батареи 4 из температурного датчика 72 и вычисляет абсолютную температуру Т из температуры ТВ.

[0185] На S602, ECU 100 вычисляет плотность i_{0_1} обменного тока частицы 1 положительного электрода. Способ вычисления плотности i_{0_1} обменного тока является идентичным способу, описанному в варианте 1 осуществления. Таким образом, ECU 100 вычисляет плотность i_{0_1} обменного тока из поверхностного количества θ_{1_surf} лития (см. S703 по фиг. 17), вычисленного во время предыдущего вычисления, и абсолютной температуры Т, вычисленной на S601 посредством обращения к карте (не показана), указывающей взаимосвязь соответствия плотности i_{0_1} обменного тока частицы 1 положительного электрода, поверхностного количества θ_{1_surf} лития и абсолютной температуры Т.

[0186] В варианте 2 осуществления, поскольку перенапряжения η_{Si} , η_{gra} при реакции не вычисляются, вычисление плотности i_{0_Si} обменного тока кремниевой частицы 21 и плотности i_{0_gra} обменного тока графитовой частицы 22 также опускается.

[0187] Обработка по S603-S605 является идентичной обработке (см. фиг. 12) S103-S105 в варианте 1 осуществления. С другой стороны, обработка вычисления сходимости на S606 отличается от обработки вычисления сходимости по S106 (см. фиг. 12 и 13) в варианте 1 осуществления.

[0188] Фиг. 17 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей обработку вычисления сходимости (обработку по S606 по фиг. 16) в варианте 2 осуществления. Ссылаясь на фиг. 17, в варианте 2 осуществления, обработка вычисления сходимости отличается от обработки вычисления сходимости (см. обработку по S301-S303 по фиг. 13) в варианте 1 осуществления тем, что следующая обработка по S701-S703 выполняется только для частицы 1 положительного электрода и не выполняется для кремниевой частицы 21 и графитовой частицы 22.

[0189] На S701, ECU 100 вычисляет перенапряжение η_1 при реакции частицы 1 положительного электрода из плотности i_{0_1} обменного тока частицы 1 положительного

электрода и абсолютной температуры T согласно выражению (4), описанному выше. Помимо этого, на S702, ECU 100 вычисляет распределение концентраций лития в частице 1 положительного электрода посредством решения уравнения диффузии (выражения (7), описанное выше) при заданном граничном условии (см. выражение (8)). Затем ECU
 5 100 вычисляет поверхностное количество θ_{1_surf} лития частицы 1 положительного электрода на основе распределения концентраций лития в частице 1 положительного электрода (S703, см. выражение (2), описанное выше).

[0190] На S704, ECU 100 вычисляет количество θ_2^t лития смешанной частицы 2
 10 отрицательного электрода в настоящем цикле вычисления из количества θ_1^t лития частицы 1 положительного электрода и отношения θ_{rate} емкости (известного значения) согласно выражению (47), описанному выше.

[0191] На S705, ECU 100 вычисляет потенциал U_1 разомкнутой цепи положительного
 15 электрода из поверхностного количества θ_{1_surf} лития, вычисленного на S703, посредством обращения к карте (не показана), указывающей взаимосвязь соответствия между потенциалом U_1 разомкнутой цепи положительного электрода и поверхностным количеством θ_{1_surf} лития.

[0192] Помимо этого, ECU 100 вычисляет потенциал U_2 разомкнутой цепи
 20 отрицательного электрода из количества θ_2 лития, вычисленного на S704, посредством обращения к карте (не показана), указывающей взаимосвязь соответствия между потенциалом U_2 разомкнутой цепи отрицательного электрода и поверхностным количеством θ_2 лития.

[0193] На S706, ECU 100 вычисляет вычисленное напряжение V_{calc} из потенциала V_1
 25 положительного электрода (= потенциал U_1 разомкнутой цепи положительного электрода+перенапряжение η_1 положительного электрода), потенциала U_2 разомкнутой цепи отрицательного электрода, величины падения напряжения ($=I_T R_d$) вследствие
 30 сопротивления R_d постоянному току и перенапряжения ΔV_e концентрации соли согласно выражению (56), описанному ниже. В выражении (56), как описано выше, перенапряжение η_{Si} кремния и перенапряжение η_{gra} графита задаются равными друг другу (см. выражение (49), описанное выше). Следует понимать, что поскольку хотя
 35 три перенапряжения η_1 , η_{Si} , η_{gra} при реакции отдельно вычисляются в варианте 1 осуществления, только одно перенапряжение при реакции рассматривается для батареи 4 в варианте 2 осуществления (другими словами, доля перенапряжений η_{Si} , η_{gra} при реакции в отрицательном электроде включена в перенапряжение η_1 при реакции в положительном электроде).

$$(U_1 + \eta_1) - U_2 - I_T R_d - \Delta V_e = V_{calc} \quad \dots (56)$$

[0194] Выражение (56) представляет собой выражение, идентичное выражению, которое устанавливается в одночастичной модели, в которой активное вещество
 45 положительного электрода и активное вещество отрицательного электрода просто интегрируются. Таким образом, в варианте 2 осуществления, можно сказать, что используется одночастичная модель, в отличие от трехчастичной модели в варианте 1 осуществления.

[0195] На S707, ECU 100 определяет то, устанавливается или нет условие (условие

сходимости), при котором полный ток I_T сходится. В частности, ECU 100 определяет то, меньше или нет разность (абсолютное значение) между вычисленным напряжением V_{calc} , вычисленным на S706, и измеренным напряжением V_{meas} , определенным посредством датчика 71 напряжения, заданного значения PD ($|V_{calc} - V_{meas}| < PD$). В случае если абсолютное значение разности между вычисленным напряжением V_{calc} и измеренным напряжением V_{meas} меньше заданного значения PD (на S707, "Да"), ECU 100 переводит процесс на S709. В случае если абсолютное значение разности равно или выше заданного значения PD (на S707, "Нет"), ECU 100 обновляет полный ток I_T согласно закону Ньютона (S708) и возвращает процесс на S701.

[0196] На S709, ECU 100 выполняет "обработку вычисления количества лития" для вычисления количества θ_{Si} лития в кремниевой частице 21.

[0197] Фиг. 18 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей обработку вычисления количества лития (обработку по S709 по фиг. 17) в варианте 2 осуществления. Ссылаясь на фиг. 18, на S801, ECU 100 вычисляет величину $\Delta\theta_2$ изменения лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода. Более конкретно, величина $\Delta\theta_2$ изменения лития может вычисляться посредством вычисления количества θ_2 лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода, вычисленного из количества θ_1 лития частицы 1 положительного электрода и отношения θ_{rate} емкости согласно выражению (47), описанному выше, два раза во время предыдущего вычисления и во время настоящего вычисления и вычисления разности между количествами θ_2 лития.

[0198] На S802, ECU 100 задает количество θ_{Si}^t лития для кремниевой частицы 21 во время настоящего вычисления, задается посредством суммирования величины $\Delta\theta_{Si}$ изменения лития (см. S810), обновленной согласно закону Ньютона, с количеством $\theta_{Si}^{t-\Delta t}$ лития для кремниевой частицы 21 во время предыдущего вычисления (см. выражение (57), описанное ниже).

$$\theta_{Si}^t = \theta_{Si}^{t-\Delta t} + \Delta\theta_{Si} \quad \dots (57)$$

[0199] На S803, ECU 100 вычисляет U_{Si_sta} в качестве потенциала разомкнутой цепи кремниевой частицы 21 в случае поверхностного механического напряжения $\sigma_{surf}=0$ из количества θ_{Si}^t лития посредством обращения к заданной карте (не показана).

[0200] На S804, ECU 100 вычисляет поверхностное механическое напряжение σ_{surf} посредством выполнения обработки вычисления поверхностного механического напряжения.

[0201] Фиг. 19 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей обработку вычисления поверхностного механического напряжения в варианте 2 осуществления. Ссылаясь на фиг. 19, блок-схема последовательности операций способа отличается от обработки вычисления поверхностного механического напряжения (см. фиг. 14) в варианте 1 осуществления тем, что не включена обработка вычисления (S401) среднего количества θ_{Si_ave} лития для кремниевой частицы 21. Другие виды обработки являются идентичными соответствующей обработке при обработке вычисления поверхностного механического напряжения в варианте 1 осуществления, и в силу этого описание не повторяется. После того, как последовательность обработки

завершается, процесс возвращается к обработке вычисления количества лития по фиг. 18.

[0202] Ссылаясь на фиг. 18 снова, на S805, ECU 100 вычисляет величину ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи из поверхностного механического напряжения σ_{surf} согласно выражению (58) (выражению, идентичному выражению (17)), описанному ниже.

$$\Delta V_{stress} = \frac{\sigma_{surf} \Omega}{F} \quad \dots (58)$$

[0203] На S806, ECU 100 вычисляет потенциал U_{Si} разомкнутой цепи кремния посредством суммирования величины ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи вследствие поверхностного механического напряжения σ_{surf} с U_{Si_sta} в качестве потенциала разомкнутой цепи кремниевой частицы 21, когда поверхностное механическое напряжение $\sigma_{surf}=0$ (см. выражение (59), описанное ниже).

$$U_{Si} = U_{Si_sta}(\theta_{Si_surf}) + \Delta V_{stress} \quad \dots (59)$$

[0204] На S807, ECU 100 вычисляет количество θ_{gra} лития для графитовой частицы 22 таким образом, что устанавливается такое условие (см. выражение (60), описанное ниже), что потенциал U_{Si} разомкнутой цепи кремния и потенциал U_{gra} разомкнутой цепи графита равны друг другу. В частности, поскольку значение левой стороны выражения (60) известно посредством обработки S805 и S806, можно сказать, что вычисляется значение потенциала U_{gra} разомкнутой цепи графита, указываемого в правой стороне выражения (60). Соответственно, количество θ_{gra} лития может вычисляться из потенциала U_{gra} разомкнутой цепи графита посредством обращения к карте (не показана), указывающей взаимосвязь соответствия между потенциалом U_{gra} разомкнутой цепи графита и количеством θ_{gra} лития.

$$U_{Si_sta}(\theta_{Si}^t) + \frac{\sigma_{surf}^t \Omega}{F} = U_{gra}(\theta_{gra}^t) \quad \dots (60)$$

[0205] На S808, ECU 100 вычисляет количество θ_2^t лития из количеств θ_{Si} , θ_{gra} лития согласно выражению (61), описанному ниже, которое устанавливается между количеством θ_{Si} лития для кремниевой частицы 21, количеством θ_{gra} лития для графитовой частицы 22 и количеством θ_2 лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода.

$$\theta_2^t = \frac{\theta_{Si}^t c_{Si,max} + \theta_{gra}^t c_{gra,max}}{c_{Si,max} + c_{gra,max}} \quad \dots (61)$$

[0206] На S809, ECU 100 вычисляет разность $(\theta_2^t - \theta_2^{t-\Delta t})$ между количеством θ_2^t лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода во время настоящего вычисления и количеством $\theta_2^{t-\Delta t}$ лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода во время предыдущего вычисления. Количество $\theta_2^{t-\Delta t}$ лития во время предыдущего вычисления временно сохраняется в запоминающем устройстве 100В для использования при настоящем вычислении. Затем ECU 100 сравнивает разность $(\theta_2^t - \theta_2^{t-\Delta t})$, вычисленную

вышеописанным способом, с величиной $\Delta\theta_2$ изменения лития, вычисленной на S801.

[0207] В случае если ошибка между разностью $(\theta_2^t - \theta_2^{t-\Delta t})$ и величиной $\Delta\theta_2$ изменения лития равна или выше порогового значения TH (на S809, "Нет"), ECU 100 переводит процесс на S810 и обновляет величину $\Delta\theta_{Si}$ изменения лития (см. S802) для использования при вычислении количества θ_{Si} лития во время следующего вычисления согласно закону Ньютона. В случае если ошибка между разностью $(\theta_2^t - \theta_2^{t-\Delta t})$ и величиной $\Delta\theta_2$ изменения лития меньше порогового значения TH (на S809, "Да"), ECU 100 использует количество θ_{Si} лития для кремниевой частицы 21, вычисленное через обработку вычисления количества лития, в качестве значения, применимого при обработке последующей стадии (при обработке оценки SOC) (S811). Вследствие этого, обработка вычисления количества лития (S709) завершается. После этого, обработка вычисления сходимости (S606) завершается, и обработка вычисления потенциала (S600) также завершается.

[0208] Возвращаясь к фиг. 16, ECU 100 выполняет обработку оценки SOC (S200) после того, как выполнение обработки вычисления потенциала (S600) завершается. Обработка оценки SOC является идентичной обработке оценки SOC (см. фиг. 12) в варианте 1 осуществления, и в силу этого подробное описание не повторяется.

[0209] Как описано выше, даже в варианте 2 осуществления, аналогично варианту 1 осуществления, поверхностное механическое напряжение σ_{surf} вычисляется через обработку вычисления поверхностного механического напряжения (S804), и величина ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи кремниевой частицы 21 вычисляется на основе поверхностного механического напряжения σ_{surf} (S805). Таким образом, потенциал U_2 разомкнутой цепи отрицательного электрода вычисляется с учетом влияния гистерезиса вследствие поверхностного механического напряжения σ_{surf} , за счет чего можно вычислять потенциал U_2 разомкнутой цепи отрицательного электрода с высокой точностью. Как результат, также можно повышать точность оценки SOC батареи 4.

[0210] В варианте 2 осуществления, диффузия лития в кремниевой частице 21 и графитовой частице 22 упрощается, и по этой причине, уравнение диффузии относительно кремниевой частицы 21 и уравнения диффузии (см. выражения (9)-(16)) относительно графитовой частицы 22 опускаются. Кремниевая частица 21 и графитовая частица 22 интегрально рассматриваются в качестве смешанной частицы 2 отрицательного электрода, поверхность и внутренняя часть смешанной частицы 2 отрицательного электрода не различаются между собой, и количество θ_2 лития в качестве параметра, полученного посредством нормализации концентрации лития в смешанной частице 2 отрицательного электрода, используется. Далее, в варианте 2 осуществления, с акцентированием внимания на том, что имеется корреляционная взаимосвязь между концентрацией лития в частице 1 положительного электрода и концентрацией лития в смешанной частице 2 отрицательного электрода, количество θ_2 лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода вычисляется из количества θ_1 лития частицы 1 положительного электрода с использованием отношения θ_{gate} емкостей касательно емкости частицы 1 положительного электрода к емкости смешанной частицы 2 отрицательного электрода (см. выражение (46), описанное выше).

[0211] В варианте 2 осуществления, диффузия лития в кремниевой частице 21 и графитовой частице 22 не учитывается намеренно, за счет чего можно уменьшать объем

вычислений (вычислительную нагрузку, объем запоминающего устройства и время вычисления) ECU 100.

Вариант 3 осуществления

[0212] При обработке вычисления количества лития (см. фиг. 18) в варианте 2 осуществления, описывается такое преимущество, что вычисление (вычисление сходимости) для обновления $\Delta\theta_{Si}$ выполняется до тех пор, пока разность $(\theta_2^t - \theta_2^{t-\Delta t})$ количества θ_2 лития между предыдущим вычислением и настоящим вычислением не сходится на величине $\Delta\theta_2$ изменения лития, вычисленной посредством другого способа (см. обработку по S809 и S810). В варианте 3 осуществления, чтобы дополнительно уменьшать объем вычислений ECU 100, описывается конфигурация, в которой потребность в вычислении сходимости исключается посредством выполнения линейной аппроксимации для того, чтобы вычислять величину $\Delta\theta_{Si}$ изменения лития для кремниевой частицы 21.

[0213] Вариант 3 осуществления отличается от варианта 2 осуществления тем, что другая обработка вычисления количества лития выполняется вместо обработки вычисления количества лития, показанной на фиг. 18. Другие виды обработки, т.е. обработка вычисления потенциала, обработка оценки SOC (см. фиг. 16), обработка вычисления сходимости (см. фиг. 17) и обработка вычисления поверхностного механического напряжения (см. фиг. 19), являются идентичными соответствующей обработке в варианте 2 осуществления, и в силу этого описание не повторяется. Общая конфигурация системы аккумуляторной батареи согласно варианту 3 осуществления является идентичной общей конфигурации (см. фиг. 1) системы 10 аккумуляторной батареи согласно варианту 1 осуществления.

Линейная аппроксимация распределения лития

[0214] Интервал от предыдущего вычисления до настоящего вычисления составляет порядка от десятков миллисекунд до сотен миллисекунд и является достаточно коротким. Другими словами, величина $\Delta\theta$ изменения лития (подробнее, величина $\Delta\theta_{Si}$ изменения лития для кремниевой частицы) от предыдущего вычисления до настоящего вычисления считается достаточно небольшой. Соответственно, в случае если разложение в ряд Тейлора подвергается потенциалу V_{Si} кремния около определенного количества θ_{Si}' лития, выражение (62), описанное ниже, извлекается.

$$V_{Si}(\theta_{Si}) = V_{Si}(\theta_{Si}') + \left. \frac{\partial V_{Si}}{\partial \theta_{Si}} \right|_{\theta_{Si}=\theta_{Si}'} (\theta_{Si} - \theta_{Si}') + \frac{1}{2!} \left. \frac{\partial^2 V_{Si}}{\partial \theta_{Si}^2} \right|_{\theta_{Si}=\theta_{Si}'} (\theta_{Si} - \theta_{Si}')^2 + \dots \quad \dots (62)$$

[0215] В выражении (62), в случае если $(\theta_{Si} - \theta_{Si}')$ является незначительным, члены второго порядка и выше $(\theta_{Si} - \theta_{Si}')$ пренебрежимо малы. Соответственно, выражение (62) модифицируется в качестве выражения (63), описанного ниже.

$$V_{Si}(\theta_{Si}) = V_{Si}(\theta_{Si}') + \left. \frac{\partial V_{Si}}{\partial \theta_{Si}} \right|_{\theta_{Si}=\theta_{Si}'} (\theta_{Si} - \theta_{Si}') \quad \dots (63)$$

[0216] В выражении (63), в случае если $V_{Si}(\theta_{Si}) - V_{Si}(\theta_{Si}') = \Delta V_{Si}$ и $\theta_{Si} - \theta_{Si}' = \Delta\theta_{Si}$, получается выражение (64), описанное ниже.

$$\Delta V_{Si} = \left. \frac{\partial V_{Si}}{\partial \theta_{Si}} \right|_{\theta_{Si}=\theta_{Si}'} \Delta\theta_{Si} \quad \dots (64)$$

[0217] Поскольку потенциал U_{Si} разомкнутой цепи (потенциал разомкнутой цепи кремния) кремниевой частицы 21 задается посредством выражения (65), описанного ниже, выражение (64) может представляться как выражение (66), описанное ниже.

$$U_{Si} = U_{Si_sta}(\theta_{Si_surf}) + \frac{\sigma_{surf} \Omega}{F} \quad \dots (65)$$

$$\Delta V_{Si} = \left. \frac{\partial(U_{Si_sta} + \sigma_{surf} \Omega / F)}{\partial \theta_{Si}} \right|_{\theta_{Si} = \theta_{Si}'} \Delta \theta_{Si} \quad \dots (66)$$

[0218] В отношении графитовой частицы 22, тогда как отсутствует член, включающий в себя поверхностное механическое напряжение σ_{surf} (второй член в правой стороне выражения (65), описанного выше), величина ΔV_{gra} изменения потенциала графитовой частицы 22 может представляться как выражение (67), описанное ниже, через идентичное вычисление.

$$\Delta V_{gra} = \left. \frac{\partial U_{gra}}{\partial \theta_{gra}} \right|_{\theta_{gra} = \theta_{gra}'} \Delta \theta_{gra} \quad \dots (67)$$

[0219] Поскольку кремниевая частица 21 и графитовая частица 22 постоянно имеют идентичный потенциал ($V_{Si} = V_{gra}$), в отношении величины ΔV_{Si} изменения потенциала кремния и величины ΔV_{gra} изменения потенциала графита, устанавливается такая взаимосвязь, что обе из величины ΔV_{Si} изменения и величины ΔV_{gra} изменения равны друг другу ($\Delta V_{Si} = \Delta V_{gra}$). Взаимосвязь представляется как выражение (68), описанное ниже, с использованием выражений (66) и (67), описанных выше.

$$\left. \frac{\partial(U_{Si_sta} + \sigma_{surf} \Omega / F)}{\partial \theta_{Si}} \right|_{\theta_{Si} = \theta_{Si}'} \Delta \theta_{Si} = \left. \frac{\partial U_{gra}}{\partial \theta_{gra}} \right|_{\theta_{gra} = \theta_{gra}'} \Delta \theta_{gra} \quad \dots (68)$$

[0220] Выражение (69), описанное ниже, может извлекаться из выражения (68), описанного выше, посредством выполнения соответствующей модификации выражения.

$$\Delta c_{Si} : \Delta c_{gra} = \left. \frac{\partial U_{gra}}{\partial \theta_{gra}} \right|_{\theta_{gra} = \theta_{gra}'} c_{Si,max} : \left. \frac{\partial(U_{Si_sta} + \sigma_{surf} \Omega / F)}{\partial \theta_{Si}} \right|_{\theta_{Si} = \theta_{Si}'} c_{gra,max} \quad \dots (69)$$

[0221] В случае если величина Δc_2 изменения концентрации лития во всей смешанной частице 2 отрицательного электрода известна, величина Δc_{Si} изменения концентрации лития для кремниевой частицы 21 и величина Δc_{gra} изменения концентрации лития для графитовой частицы 22 могут вычисляться с использованием выражения (69). Величина Δc_2 изменения концентрации лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода задается посредством выражения (70), описанного ниже.

$$\Delta c_2 = \Delta \theta_2 (c_{Si,max} + c_{gra,max}) \quad \dots (70)$$

[0222] Величина $\Delta \theta_{Si}$ изменения лития для кремниевой частицы 21 может представляться как выражение (71), описанное ниже из выражений (69) и выражения (70).

$$\Delta\theta_{Si} = \Delta\theta_2 \left(c_{Si,max} + c_{gra,max} \right) \frac{\frac{\partial U_{gra}}{\partial \theta_{gra}} \Big|_{\theta_{gra}=\theta_{gra}'}}{\frac{\partial U_{gra}}{\partial \theta_{gra}} \Big|_{\theta_{gra}=\theta_{gra}'} \times c_{Si,max} + \frac{\partial (U_{Si_sta} + \sigma_{surf} \Omega / F)}{\partial \theta_{Si}} \Big|_{\theta_{Si}=\theta_{Si}'}} \times c_{gra,max} \dots (71)$$

[0223] При обработке вычисления количества лития (см. фиг. 18) в варианте 2 осуществления, величина $\Delta\theta_{Si}$ изменения лития для кремниевой частицы 21 многократно обновляется до тех пор, пока разность $(\theta_2^t - \theta_2^{t-\Delta t})$ между количествами θ_2 лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода двух последовательных вычислений не сходится на величине $\Delta\theta_2$ изменения лития, вычисленной из количества θ_1 лития и отношения θ_{rate} емкости частицы 1 положительного электрода. По этой причине, большой объем вычислений запрашивается для ECU 100, чтобы принимать окончательное решение относительно величины $\Delta\theta_{Si}$ изменения лития. Напротив, в варианте 3 осуществления, как следует понимать из выражения (71), величина $\Delta\theta_{Si}$ изменения лития для кремниевой частицы 21 вычисляется из величины $\Delta\theta_2$ изменения лития (величины $\Delta\theta_2$ изменения лития, вычисленной из количества θ_1 лития и отношения θ_{rate} емкости частицы 1 положительного электрода) смешанной частицы 2 отрицательного электрода посредством одного вычисления. Следовательно, можно значительно уменьшать объем вычислений для того, чтобы определять величину $\Delta\theta_{Si}$ изменения лития.

Последовательность операций обработки вычисления количества лития

[0224] Фиг. 20 является блок-схемой последовательности операций способа, показывающей обработку вычисления количества лития в варианте 3 осуществления. На блок-схеме последовательности операций способа, приведены начальное значение количества θ_{Si} лития для кремниевой частицы 21 и начальное значение количества θ_{gra} лития для графитовой частицы, и количества θ_{Si} , θ_{gra} лития обновляются каждый раз, когда последовательность обработки многократно выполняется.

[0225] Ссылаясь на фиг. 20, обработка по S1002-S1006 представляет собой обработку, которая выполняется для кремниевой частицы 21, и обработка по S1007-S1009 представляет собой обработку, которая выполняется для графитовой частицы 22. ECU 100 может изменять последовательность этих видов обработки, может выполнять обработку по S1007-S1009 для графитовой частицы 22 и после этого может выполнять обработку по S1002-S1006 для кремниевой частицы 21.

[0226] На S1001, аналогично S801 (см. фиг. 18) обработки вычисления количества лития в варианте 2 осуществления, ECU 100 вычисляет величину $\Delta\theta_2$ изменения лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода. Таким образом, величина $\Delta\theta_2$ изменения лития вычисляется посредством вычисления количества θ_2 лития смешанной частицы 2 отрицательного электрода, вычисленной из количества θ_1 лития и отношения θ_{rate} емкости частицы 1 положительного электрода согласно выражению (47), описанному выше, два раза во время предыдущего вычисления и во время настоящего вычисления и вычисления разности между количествами θ_2 лития.

[0227] На S1002, вычисляется количество θ_{Si}' лития ($=\theta_{Si}^t$), которое изменяется относительно количества θ_{Si} лития ($=\theta_{Si}^{t-\Delta t}$) кремниевой частицы 21 во время предыдущего вычисления на незначительное количество. Незначительное количество задается равным достаточно небольшому количеству таким образом, что разложение в ряд Тейлора может подвергаться потенциалу V_{Si} кремния около количества θ_{Si}' лития (см. выражение (62), описанное выше).

[0228] На S1003, ECU 100 вычисляет потенциал U_{Si_sta} разомкнутой цепи кремния в качестве потенциала разомкнутой цепи кремниевой частицы 21, когда поверхностное механическое напряжение $\sigma_{surf}=0$. Подробнее, ECU 100 вычисляет потенциал U_{Si_sta} разомкнутой цепи кремния, соответствующий количеству θ_{Si}' лития, вычисленному на S1001, посредством обращения к карте (не показана), указывающей взаимосвязь соответствия между количеством θ_{Si} лития для кремниевой частицы 21 и потенциалом U_{Si_sta} разомкнутой цепи кремния.

[0229] На S1004, ECU 100 выполняет обработку вычисления поверхностного механического напряжения, чтобы вычислять поверхностное механическое напряжение σ_{surf} кремниевой частицы 21. Как описано выше, обработка вычисления поверхностного механического напряжения осуществляется вместе с обработкой вычисления поверхностного механического напряжения (см. фиг. 19) в варианте 2 осуществления.

[0230] На S1005, ECU 100 вычисляет величину ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи ($=\sigma_{surf}\Omega/F$) на основе результата вычисления (поверхностного механического напряжения σ_{surf} кремниевой частицы 21) обработки вычисления поверхностного механического напряжения (см. выражение (58), описанное выше).

[0231] На S1006, ECU 100 вычисляет потенциал U_{Si} разомкнутой цепи кремния посредством суммирования величины ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи с потенциалом U_{Si_sta} разомкнутой цепи кремния (результатом вычисления при обработке S1003) (см. выражение (59), описанное выше).

[0232] На S1007, ECU 100 вычисляет частный дифференциал $\partial U_{Si}/\partial \theta_{Si}$ потенциала U_{Si} разомкнутой цепи кремния с количеством кремния $\theta_{Si}=\theta_{Si}'$. Значение вычисленного частного дифференциала используется во втором члене знаменателя выражения (75).

[0233] На S1008, аналогично обработке S1001, ECU 100 вычисляет количество θ_{gra}' кремния, которое изменяется относительно количества θ_{gra} лития для графитовой частицы 22 во время предыдущего вычисления на незначительное количество.

[0234] На S1009, ECU 100 вычисляет потенциал U_{gra} разомкнутой цепи графита на основе количества θ_{gra} лития для графитовой частицы 22, вычисленного на S1007. Карта (не показана), подготовленная заранее, используется при вычислении.

[0235] На S1010, аналогично обработке S1006, ECU 100 вычисляет частный дифференциал $\partial U_{gra}/\partial \theta_{gra}$ потенциала U_{gra} разомкнутой цепи графита с количеством кремния $\theta_{gra}=\theta_{gra}'$. Значение вычисленного частного дифференциала используется в первых членах числителя и знаменателе выражения (75).

[0236] На S1011, ECU 100 вычисляет величину $\Delta \theta_{Si}$ изменения лития на основе выражения (75), описанного выше. В частности, величина $\Delta \theta_2$ изменения лития смешанной частицы отрицательного электрода, вычисленная на S1001, частный

дифференциал $\partial U_{Si}/\partial \theta_{Si}$ потенциала U_{Si} разомкнутой цепи кремния, вычисленный на S1007, и частный дифференциал $\partial U_{gra}/\partial \theta_{gra}$ потенциала U_{gra} разомкнутой цепи графита, вычисленный на S1010, подставляются в выражение (75), за счет чего вычисляется величина $\Delta \theta_{Si}$ изменения лития.

[0237] Как описано выше, согласно варианту 3 осуществления, аналогично вариантам 1 и 2 осуществления, поверхностное механическое напряжение σ_{surf} вычисляется через обработку вычисления поверхностного механического напряжения (S1004), и величина ΔV_{stress} изменения потенциала разомкнутой цепи кремниевой частицы 21 вычисляется на основе поверхностного механического напряжения σ_{surf} (S1005). Таким образом, потенциал U_{Si} разомкнутой цепи кремния вычисляется с учетом влияния гистерезиса вследствие поверхностного механического напряжения σ_{surf} , за счет чего можно повышать точность вычисления потенциала U_{Si} разомкнутой цепи кремния и, как результат, повышать точность оценки SOC батареи 4.

[0238] В варианте 3 осуществления, выражение (75) извлекается посредством модификации выражения с использованием произведения ($c_{Si,max} * c_{gra,max}$) предельных концентраций лития при таком условии, что потенциал V_{Si} кремния (см. выражение (63), описанное выше), подвергнутый аппроксимации (т.е. линейной аппроксимации), в которой членах второго порядка и выше игнорируются после разложения в ряд Тейлора, и потенциал V_{gra} графита, подвергнутый идентичной аппроксимации, равны друг другу (см. выражение (68), описанное выше). Значения подставляются в члены выражения (75), за счет чего вычисление сходимости не требуется, и величина $\Delta \theta_{Si}$ изменения лития может вычисляться через простое умножение и деление. Следовательно, согласно варианту 3 осуществления, можно дополнительно уменьшать вычислительную нагрузку и объем запоминающего устройства ECU 100 по сравнению с обработкой вычисления количества лития в варианте 2 осуществления.

[0239] Управление подавлением осаждения лития, описанное в примере 2 модификации варианта 1 осуществления, может комбинироваться с обработкой вычисления потенциала в варианте 2 осуществления или может комбинироваться с обработкой вычисления потенциала в варианте 3 осуществления. Таким образом, потенциал V_2 отрицательного электрода может вычисляться посредством способа, в котором трехчастичная модель в варианте 1 осуществления в большей степени упрощается, и допустимая электрическая мощность I_{win} заряда может вычисляться согласно вычисленному потенциалу V_2 отрицательного электрода согласно блок-схеме последовательности операций способа, показанной на фиг. 19.

[0240] В вариантах 1-3 осуществления (и в примерах 1 и 2 модификации варианта 1 осуществления), описывается пример, в котором материал на основе кремния используется в качестве активного вещества отрицательного электрода, имеющего большую величину изменения объема с зарядом и разрядом, является большим. Тем не менее, активное вещество отрицательного электрода, имеющее большую величину изменения объема с зарядом и разрядом, не ограничено этим. В этом подробном описании, "активное вещество отрицательного электрода, имеющее большую величину изменения объема", означает материал, имеющий большую величину изменения объема по сравнению с величиной изменения объема (приблизительно 10%) графита с зарядом и разрядом. В качестве такого материала отрицательного электрода литий-ионной аккумуляторной батареи, примерно иллюстрируются оловянное соединение (Sn, SnO

и т.п.), германиевое (Ge) соединение или свинцовое (Pb) соединение. Литий-ионная аккумуляторная батарея не ограничена жидкостной системой и может представлять собой полимерную систему или полностью твердотельную систему.

5 [0241] Аккумуляторная батарея, к которой является применимой вышеописанная обработка вычисления потенциала, не ограничена литий-ионной аккумуляторной батареей и может представлять собой другие аккумуляторные батареи (например, никель-водородный аккумулятор).

10 [0242] Вариант осуществления, раскрытый в данном документе должен считаться просто иллюстративным, а не ограничивающим во всех отношениях. Объем настоящего раскрытия задается посредством формулы изобретения, а не вышеприведенного описания варианта осуществления, и имеет намерение включать в себя любые модификации в пределах объема и сущности, эквивалентные формуле изобретения.

(57) Формула изобретения

15 1. Система аккумуляторной батареи, содержащая:

аккумуляторную батарею, имеющую положительный электрод, включающий в себя активное вещество положительного электрода, и отрицательный электрод, включающий в себя первое и второе активные вещества отрицательного электрода; и

20 устройство управления, выполненное с возможностью оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи на основе модели активного вещества аккумуляторной батареи, при этом:

величина изменения объема первого активного вещества отрицательного электрода с изменением количества носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода превышает величину изменения объема второго активного вещества отрицательного электрода с изменением количества носителей заряда во втором активном веществе отрицательного электрода;

25 устройство управления выполнено с возможностью, при таком условии, что первое активное вещество отрицательного электрода и второе активное вещество отрицательного электрода имеют идентичный потенциал, вычисления количества носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода на основе модели первого активного вещества;

30 устройство управления выполнено с возможностью вычисления величины изменения потенциала разомкнутой цепи первого активного вещества отрицательного электрода на основе поверхностного механического напряжения первого активного вещества отрицательного электрода, определяемого согласно количеству носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода; и

35 устройство управления выполнено с возможностью вычисления потенциала разомкнутой цепи отрицательного электрода из потенциала разомкнутой цепи и величины изменения потенциала разомкнутой цепи первого активного вещества отрицательного электрода в состоянии, в котором поверхностное механическое напряжение не формируется в первом активном веществе отрицательного электрода.

2. Система аккумуляторной батареи по п. 1, в которой:

45 устройство управления выполнено с возможностью, при таком условии, что первое активное вещество отрицательного электрода и второе активное вещество отрицательного электрода имеют идентичный потенциал, отдельного вычисления тока, протекающего в первом активном веществе отрицательного электрода, и тока, протекающего во втором активном веществе отрицательного электрода, через обработку вычисления сходимости таким образом, что устанавливается заданное условие

сходимости;

устройство управления выполнено с возможностью вычисления распределения концентраций носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода и во втором активном веществе отрицательного электрода посредством решения уравнения диффузии при граничном условии, связанном с током, протекающим в первом активном веществе отрицательного электрода и во втором активном веществе отрицательного электрода; и

устройство управления выполнено с возможностью вычисления количества носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода и во втором активном веществе отрицательного электрода из распределения концентраций носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода и во втором активном веществе отрицательного электрода.

3. Система аккумуляторной батареи по п. 2, дополнительно содержащая датчик напряжения, выполненный с возможностью определения напряжения между положительным электродом и отрицательным электродом, при этом:

устройство управления выполнено с возможностью вычисления распределения концентраций носителей заряда в активном веществе положительного электрода посредством решения уравнения диффузии при граничном условии, связанном с током, протекающим в активном веществе положительного электрода;

устройство управления выполнено с возможностью вычисления количества носителей заряда в активном веществе положительного электрода из распределения концентраций носителей заряда в активном веществе положительного электрода;

устройство управления выполнено с возможностью вычисления потенциала положительного электрода на основе потенциала разомкнутой цепи активного вещества положительного электрода, который должен определяться согласно количеству носителей заряда в активном веществе положительного электрода;

устройство управления выполнено с возможностью вычисления потенциала отрицательного электрода на основе потенциала разомкнутой цепи отрицательного электрода; и

устройство управления выполнено с возможностью вычисления тока, протекающего в первом активном веществе отрицательного электрода, с таким условием, что разность потенциалов между потенциалом положительного электрода и потенциалом отрицательного электрода совпадает с напряжением, определенным посредством датчика напряжения, в качестве условия сходимости.

4. Система аккумуляторной батареи по п. 2 или 3, в которой:

устройство управления выполнено с возможностью разделения тока, протекающего в первом активном веществе отрицательного электрода, на ток реакции, предусмотренный во внедрении и десорбции носителей заряда, и ток конденсатора, не предусмотренный во внедрении и десорбции носителей заряда, и вычисления перенапряжения при реакции первого активного вещества отрицательного электрода посредством подстановки тока реакции в выражение отношения Батлера-Фольмера; и

устройство управления выполнено с возможностью вычисления потенциала отрицательного электрода из потенциала разомкнутой цепи отрицательного электрода и перенапряжения при реакции первого активного вещества отрицательного электрода.

5. Система аккумуляторной батареи по п. 1, в которой:

устройство управления выполнено с возможностью вычисления общего количества носителей заряда в первом и втором активных веществах отрицательного электрода

из количества носителей заряда в активном веществе положительного электрода согласно выражению отношения, в котором взаимосвязь, которая должна устанавливаться между количеством носителей заряда в активном веществе положительного электрода и общим количеством носителей заряда в первом и втором активных веществах отрицательного электрода, задается с использованием отношения емкостей касательно емкости положительного электрода к емкости отрицательного электрода; и

устройство управления выполнено с возможностью вычисления количества носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода и во втором активном веществе отрицательного электрода с использованием закона сохранения величины заряда, который должен устанавливаться между величиной временного изменения общего количества носителей заряда в первом и втором активных веществах отрицательного электрода и током, протекающим в активном веществе положительного электрода.

6. Система аккумуляторной батареи по п. 1, в которой:

устройство управления выполнено с возможностью вычисления общего количества носителей заряда в первом и втором активных веществах отрицательного электрода из количества носителей заряда в активном веществе положительного электрода согласно выражению отношения, в котором взаимосвязь, которая должна устанавливаться между количеством носителей заряда в активном веществе положительного электрода и общим количеством носителей заряда в первом и втором активных веществах отрицательного электрода, задается с использованием отношения емкостей касательно емкости положительного электрода к емкости отрицательного электрода; и

устройство управления выполнено с возможностью вычисления количества носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода и во втором активном веществе отрицательного электрода из величины временного изменения общего количества носителей заряда в первом и втором активных веществах отрицательного электрода согласно заданному выражению отношения, аппроксимирующему то, что потенциал первого активного вещества отрицательного электрода изменяется линейно с изменением количества носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода, и аппроксимирующему то, что потенциал второго активного вещества отрицательного электрода изменяется линейно с изменением количества носителей заряда во втором активном веществе отрицательного электрода.

7. Система аккумуляторной батареи по любому из пп. 1-3, в которой:

аккумуляторная батарея представляет собой литий-ионную аккумуляторную батарею;

и

устройство управления выполнено с возможностью, в случае если потенциал отрицательного электрода, который должен вычисляться из потенциала разомкнутой цепи отрицательного электрода, опускается ниже заданного потенциала, который выше потенциала металлического лития, в большей степени подавления электрической мощности заряда в аккумуляторную батарею, чем в случае, если потенциал отрицательного электрода превышает заданный потенциал.

8. Система аккумуляторной батареи по любому из пп. 1-3, в которой:

первое активное вещество отрицательного электрода представляет собой материал на основе кремния; а

второе активное вещество отрицательного электрода представляет собой материал на основе углерода.

9. Способ оценки внутреннего состояния аккумуляторной батареи, причем аккумуляторная батарея имеет положительный электрод, включающий в себя активное вещество положительного электрода, и отрицательный электрод, включающий в себя первое и второе активные вещества отрицательного электрода, при этом величина
5 изменения объема первого активного вещества отрицательного электрода с изменением количества носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода превышает величину изменения объема второго активного вещества отрицательного электрода с изменением количества носителей заряда во втором активном веществе отрицательного электрода, причем способ представляет собой способ оценки
10 внутреннего состояния аккумуляторной батареи на основе модели активного вещества, при этом способ включает этапы, на которых:

при таком условии, что первое активное вещество отрицательного электрода и второе активное вещество отрицательного электрода имеют идентичный потенциал, вычисляют количество носителей заряда в первом активном веществе отрицательного электрода
15 на основе модели первого активного вещества;

вычисляют величину изменения потенциала разомкнутой цепи первого активного вещества отрицательного электрода на основе поверхностного механического напряжения первого активного вещества отрицательного электрода, определяемого согласно количеству носителей заряда в первом активном веществе отрицательного
20 электрода; и

вычисляют потенциал разомкнутой цепи отрицательного электрода из потенциала разомкнутой цепи и величину изменения потенциала разомкнутой цепи первого активного вещества отрицательного электрода в состоянии, в котором поверхностное механическое напряжение не формируется в первом активном веществе отрицательного
25 электрода.

30

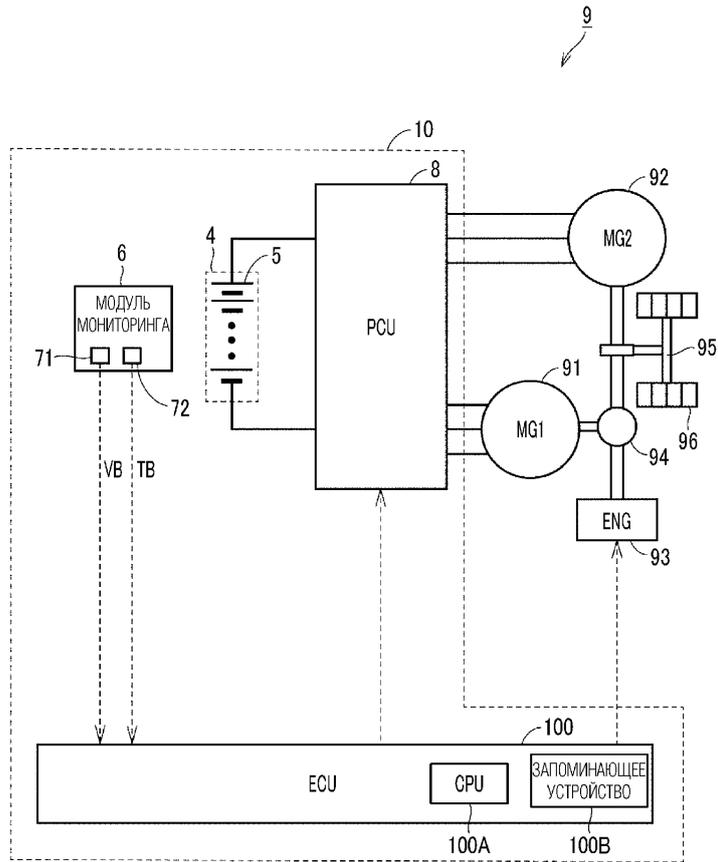
35

40

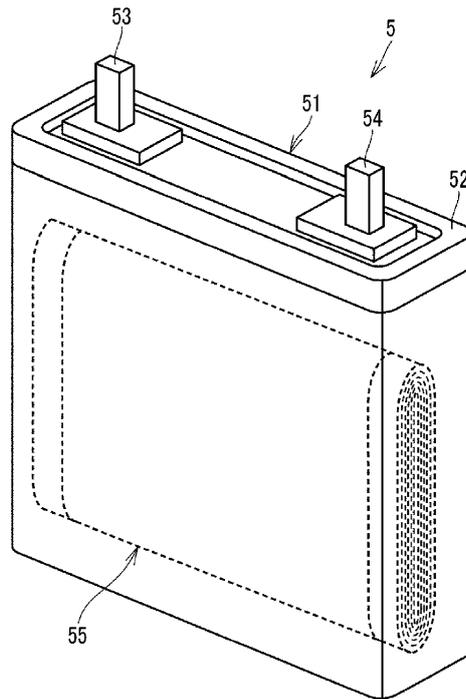
45

1/21

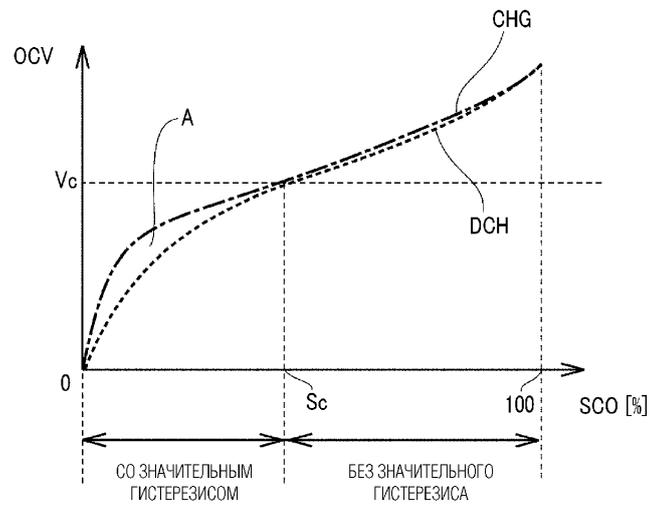
ФИГ. 1



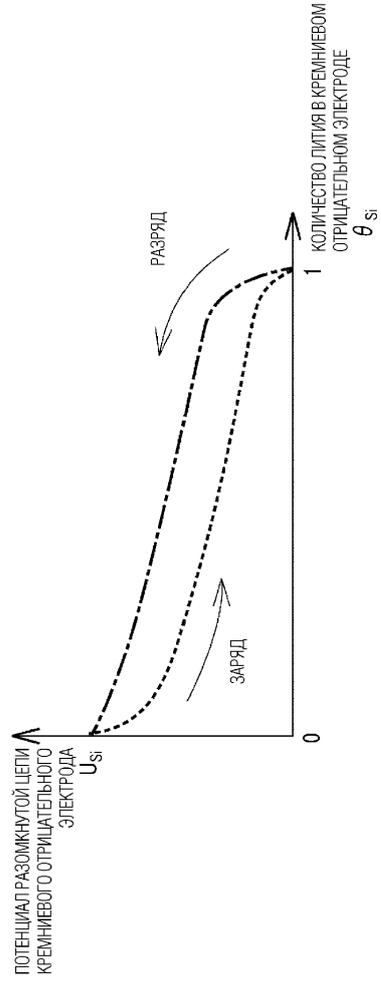
2/21
ФИГ. 2



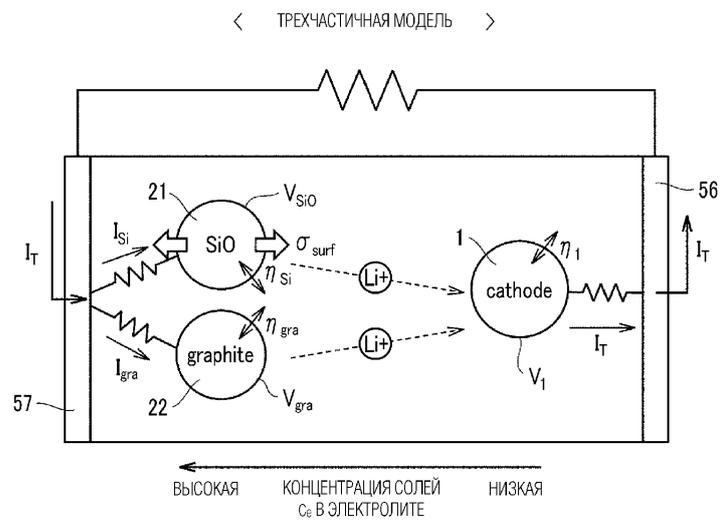
3/21
 ФИГ. 3



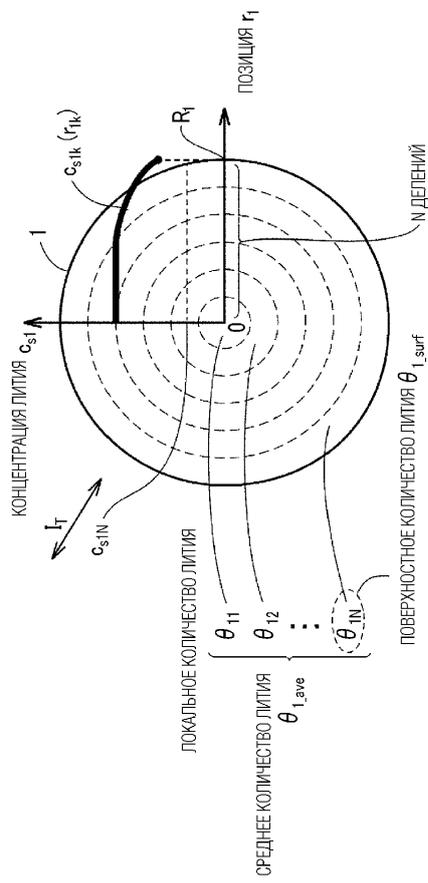
ФИГ. 4



5/21
 ФИГ. 5



ФИГ. 6



7/21

ФИГ. 7А

ОБОЗНАЧЕНИЕ	ЕДИНИЦА	ЭЛЕМЕНТ
U_1	V	ПОТЕНЦИАЛ РАЗОМКНУТОЙ ЦЕПИ (ОСР) ЧАСТИЦЫ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА
U_2	V	ПОТЕНЦИАЛ РАЗОМКНУТОЙ ЦЕПИ (ОСР) СМЕШАННОЙ ЧАСТИЦЫ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА
U_{Si}	V	ПОТЕНЦИАЛ РАЗОМКНУТОЙ ЦЕПИ (ОСР) КРЕМНИЕВОЙ ЧАСТИЦЫ
U_{gra}	V	ПОТЕНЦИАЛ РАЗОМКНУТОЙ ЦЕПИ (ОСР) ГРАФИТОВОЙ ЧАСТИЦЫ
ΔV_{stress}	V	ВЕЛИЧИНА ИЗМЕНЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА РАЗОМКНУТОЙ ЦЕПИ КРЕМНИЕВОЙ ЧАСТИЦЫ ВСЛЕДСТВИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ
$\Delta V_{Si,sta}$	V	ПОТЕНЦИАЛ РАЗОМКНУТОЙ ЦЕПИ КРЕМНИЕВОЙ ЧАСТИЦЫ В СЛУЧАЕ, В КОТОРОМ ПОВЕРХНОСТНОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ РАВНО НУЛЮ
V_1	V	ПОТЕНЦИАЛ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА
V_2	V	ПОТЕНЦИАЛ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА
ΔV_e	V	ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ СОЛИ
η_i	V	ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЕ ПРИ РЕАКЦИИ (+: ОСАЖДЕНИЕ Li, -: ВНЕДРЕНИЕ Li)
c_{Si}	mol/cm ³	КОНЦЕНТРАЦИЯ ЛИТИЯ В АКТИВНОМ ВЕЩЕСТВЕ
θ_i	-	ЛОКАЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО ЛИТИЯ (= КОНЦЕНТРАЦИЯ ЛИТИЯ/ПРЕДЕЛЬНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ ЛИТИЯ)
$\theta_{i,surf}$	-	ЛОКАЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО ЛИТИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА
$\theta_{i,ave}$	-	СРЕДНЕЕ КОЛИЧЕСТВО ЛИТИЯ В АКТИВНОМ ВЕЩЕСТВЕ
$\theta_{1,fix}$	-	ТОЧКА СООТВЕТСТВИЯ ЛОКАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ЛИТИЯ В ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ ЭЛЕКТРОДЕ/ ОТРИЦАТЕЛЬНОМ ЭЛЕКТРОДЕ (СТОРОНА ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА)
$\theta_{2,fix}$	-	ТОЧКА СООТВЕТСТВИЯ ЛОКАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ЛИТИЯ В ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ ЭЛЕКТРОДЕ/ОТРИЦАТЕЛЬНОМ ЭЛЕКТРОДЕ (СТОРОНА ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА)
θ_{rate}	-	ОТНОШЕНИЕ (ОТНОШЕНИЕ ЕМКОСТИ) КАСАТЕЛЬНО ЕМКОСТИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА К ЕМКОСТИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА
I_T	A/cm ²	ПОЛНЫЙ ТОК (+: РАЗРЯД, -: ЗАРЯД)
I_i	A/cm ²	ТОК, ПРОТЕКАЮЩИЙ В КРЕМНИЕВОЙ ЧАСТИЦЕ ИЛИ ГРАФИТОВОЙ ЧАСТИЦЕ
σ_{surf}	Pa	МЕХАНИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, ПРИКЛАДЫВАЕМОЕ К ПОВЕРХНОСТИ SiO (+: В СИЛУ РАСТЯЖЕНИЯ, -: В СИЛУ СЖАТИЯ)
σ_{com}	Pa	МЕХАНИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, КОГДА SiO ПЕРЕХОДИТ ЧЕРЕЗ ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ (ПРИ СЖАТИИ)
σ_{ten}	Pa	МЕХАНИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, КОГДА SiO ПЕРЕХОДИТ ЧЕРЕЗ ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ (ПРИ РАСТЯЖЕНИИ)

8/21

ФИГ. 7В

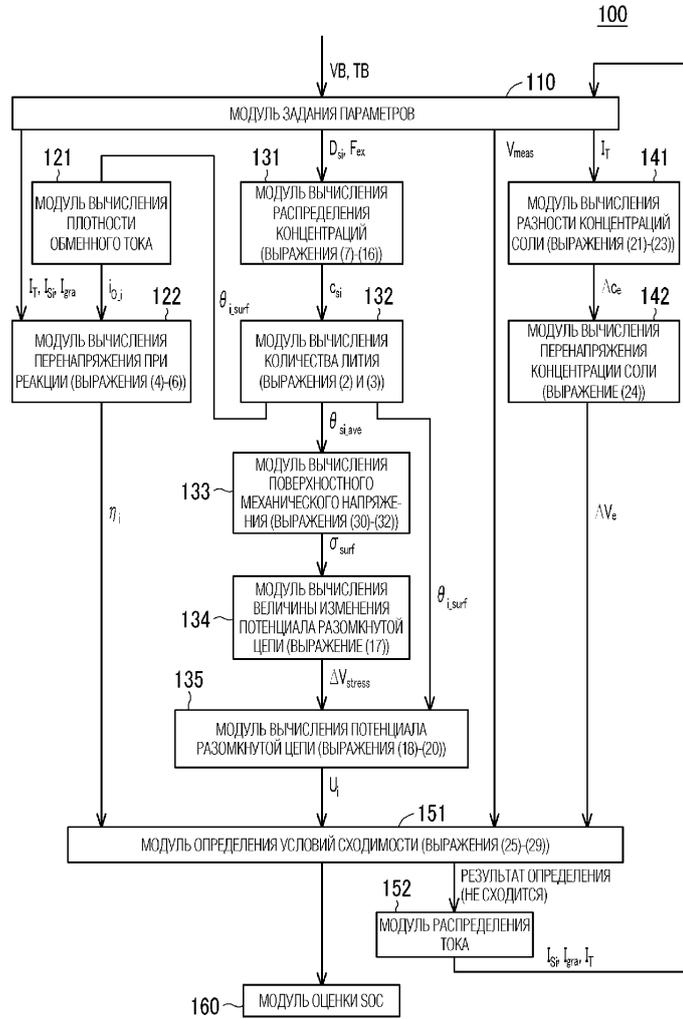
ОБОЗНАЧЕНИЕ	ЕДИНИЦА	ЭЛЕМЕНТ
Ω	cm^3/mol	ПОТЕНЦИАЛ РАЗОМКНУТОЙ ЦЕПИ (ОСР) ЧАСТИЦЫ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА
α	$\text{Pa}/(\text{mol}/\text{cm}^3)$	ПРОПОРЦИОНАЛЬНАЯ КОНСТАНТА
$R_{\text{ч}}$	Ωcm^3	СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА
Δc_e	mol/cm^3	РАЗНОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИЙ СОЛИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА/ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА
α_e	-	КОЭФФИЦИЕНТ УРАВНЕНИЯ ДИФФУЗИИ КОНЦЕНТРАЦИИ СОЛЕЙ
β	-	КОЭФФИЦИЕНТ УРАВНЕНИЯ ДИФФУЗИИ КОНЦЕНТРАЦИИ СОЛЕЙ
i_{0i}	A/cm^2	ПЛОТНОСТЬ ОБМЕННОГО ТОКА
a_s	-	УДЕЛЬНАЯ ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТИ АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА
L_i	cm	ТОЛЩИНА ЭЛЕКТРОДА
β_i	-	КОЭФФИЦИЕНТ КОРРЕКЦИИ БАТЛЕРА-ФОЛЬМЕРА
$c_{\text{Si,max}}$	mol/cm^3	ПРЕДЕЛЬНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ ЛИТИЯ ДЛЯ КРЕМНИЕВОЙ ЧАСТИЦЫ (ЕМКОСТЬ, КОГДА θ_{Si} РАВНО ОТ 0 ДО 1)
$c_{\text{gra,max}}$	mol/cm^3	ПРЕДЕЛЬНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ ЛИТИЯ ДЛЯ ГРАФИТОВОЙ ЧАСТИЦЫ (ЕМКОСТЬ, КОГДА θ_{gra} РАВНО ОТ 0 ДО 1)
$c_{i,\text{SOC}0}$	mol/cm^3	КОНЦЕНТРАЦИЯ ЛИТИЯ, СООТВЕТСТВУЮЩАЯ SOC = 0%
$c_{i,\text{SOC}100}$	mol/cm^3	КОНЦЕНТРАЦИЯ ЛИТИЯ, СООТВЕТСТВУЮЩАЯ SOC = 100%
F	C/mol	ПОСТОЯННАЯ ФАРАДЕЯ
R	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	ГАЗОВАЯ ПОСТОЯННАЯ

9/21

ФИГ. 8

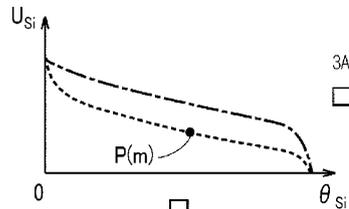
ОБОЗНАЧЕНИЕ	ЭЛЕМЕНТ
1	ПАРАМЕТР ЧАСТИЦЫ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА
Si	ПАРАМЕТР КРЕМНИЕВОЙ ЧАСТИЦЫ
gra	ПАРАМЕТР ГРАФИТОВОЙ ЧАСТИЦЫ
2	ПАРАМЕТР СМЕШАННОЙ ЧАСТИЦЫ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА
surf	ЗНАЧЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА
ave	СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ В АКТИВНОМ ВЕЩЕСТВЕ

10/21
ФИГ. 9

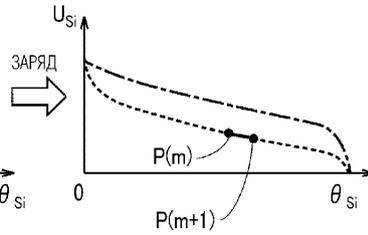


11/21

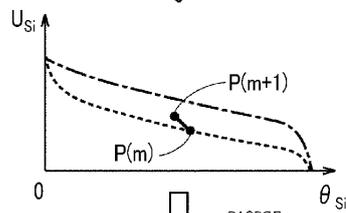
ФИГ. 10А



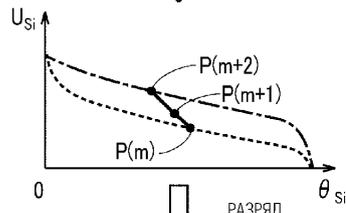
ФИГ. 10В



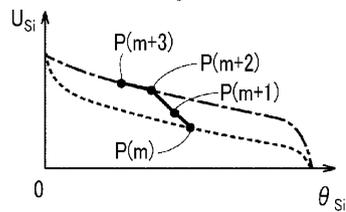
ФИГ. 10С



ФИГ. 10D

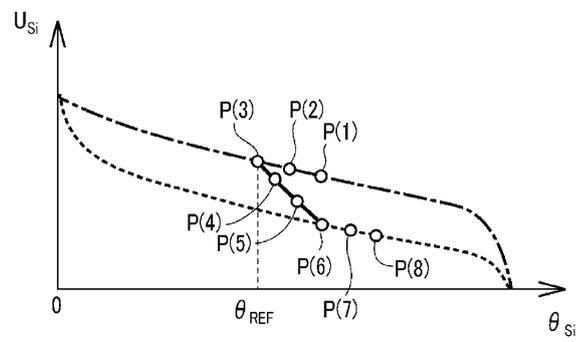


ФИГ. 10E

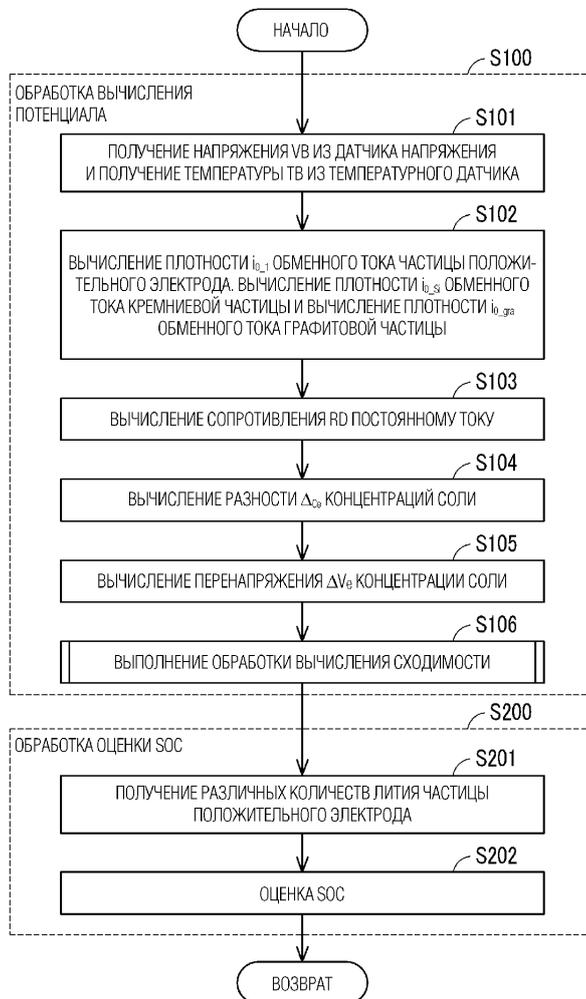


12/21

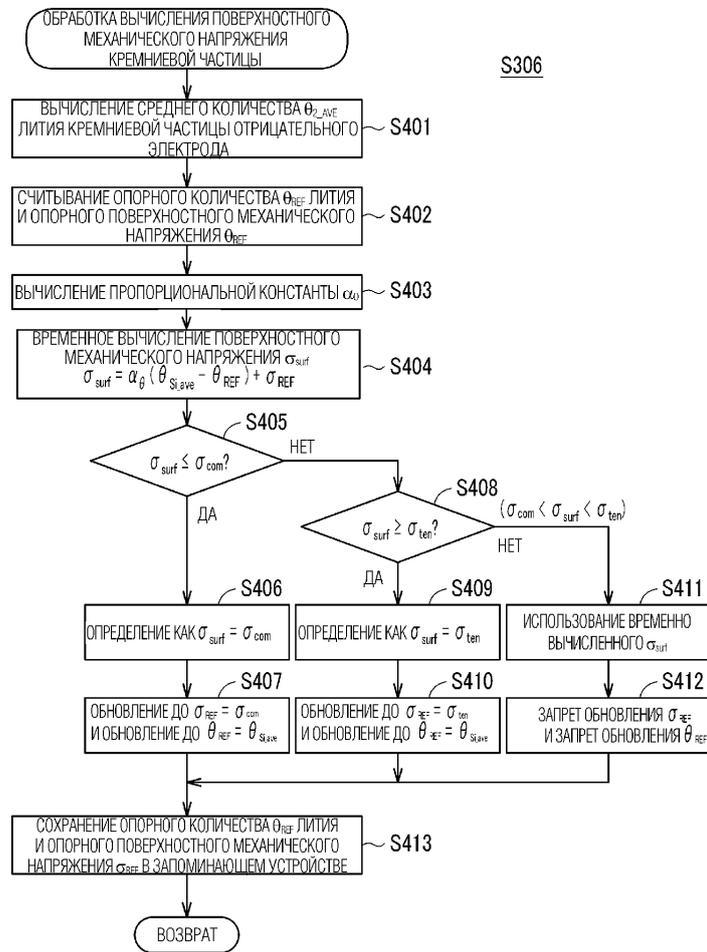
ФИГ. 11



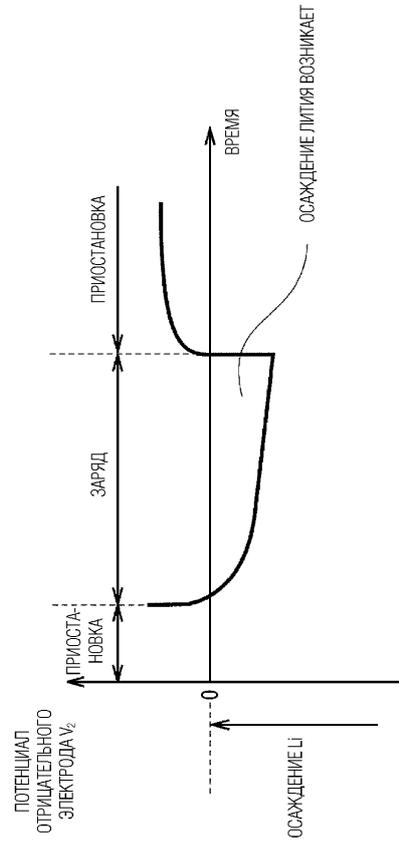
13/21
ФИГ. 12



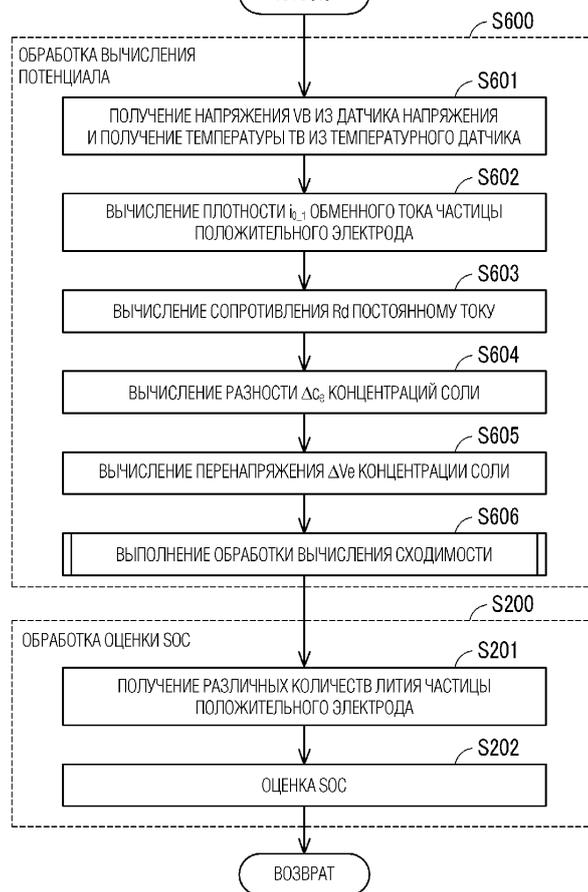
15/21
ФИГ. 14



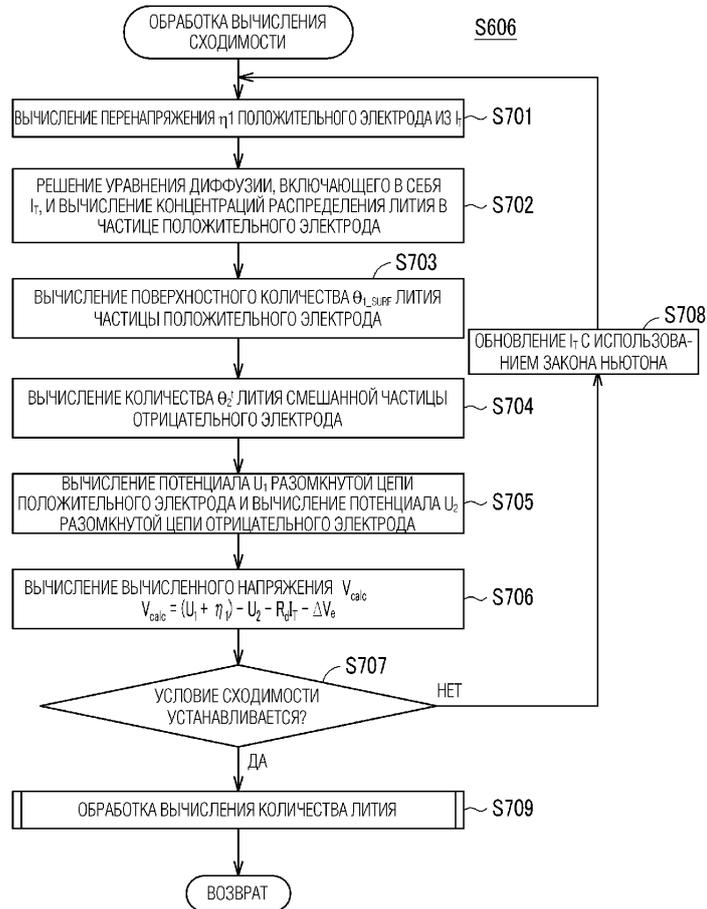
ФИГ. 15



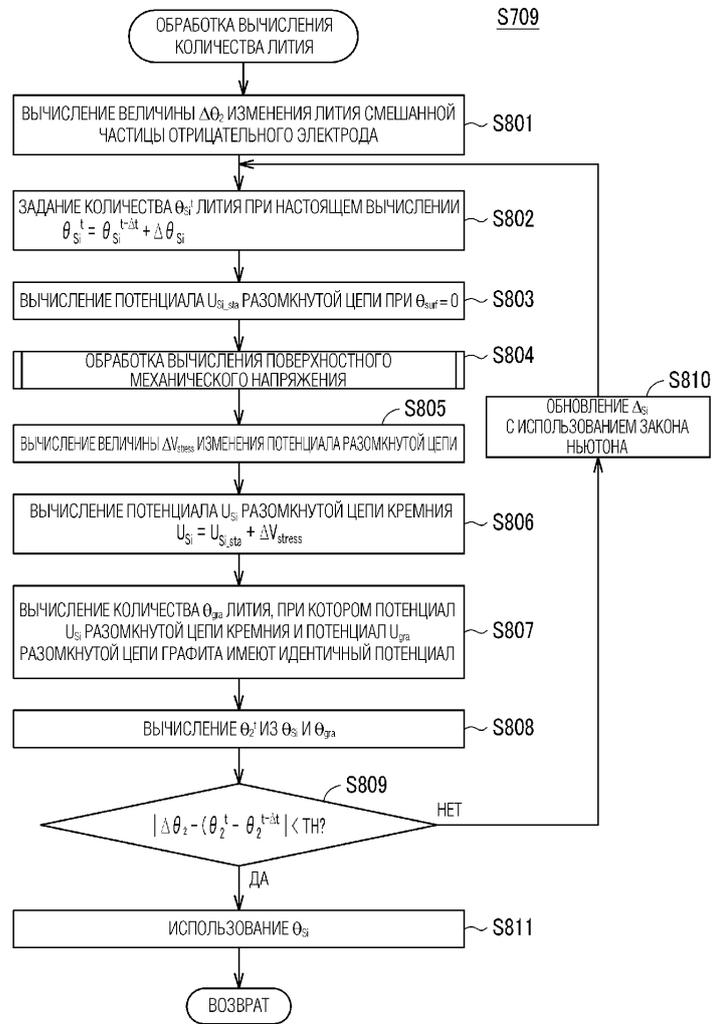
17/21
ФИГ. 16



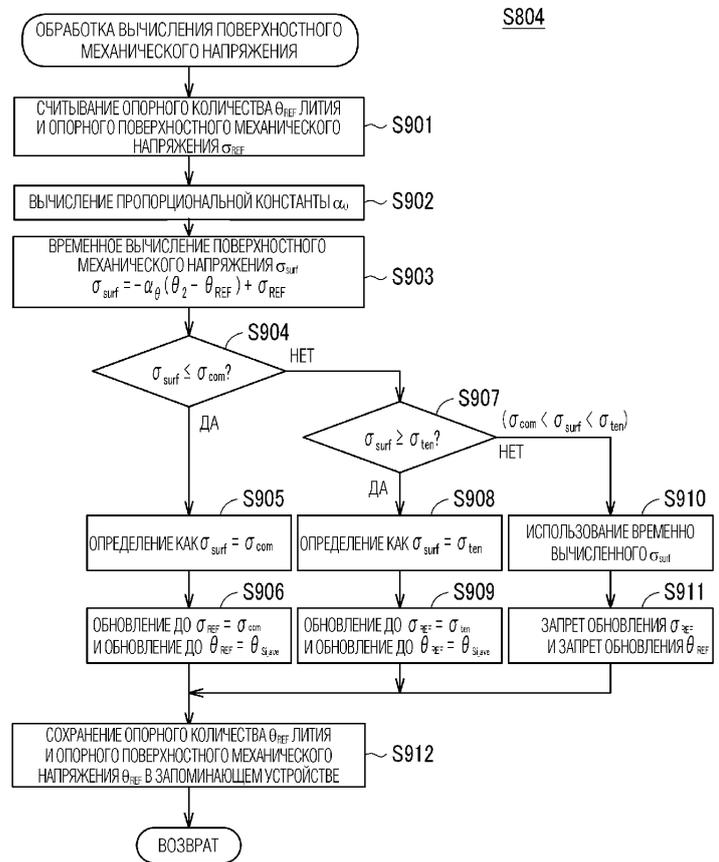
18/21
ФИГ. 17



19/21
ФИГ. 18



20/21
ФИГ. 19



21/21
ФИГ. 20

