

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **034889**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.04.02

(21) Номер заявки
201890024

(22) Дата подачи заявки
2015.12.23

(51) Int. Cl. **F03D 7/04** (2006.01)
F03D 9/25 (2016.01)
H02K 21/00 (2006.01)

(54) **СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТБОРА МОЩНОСТИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ**

(43) **2018.12.28**

(86) **РСТ/RU2015/000918**

(87) **WO 2017/111645 2017.06.29**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "ВДМ-
ТЕХНИКА" (RU)**

(72) Изобретатель:

**Масолов Владимир Геннадьевич,
Березин Валерий Сергеевич,
Логинов Анатолий Леонидович,
Полетаев Иван Георгиевич, Масолов
Андрей Геннадьевич, Фадеев Иван
Александрович, Худоногов Андрей
Викторович (RU)**

(74) Представитель:

**Котлов Д.В., Черняев М.А., Яремчук
А.А., Пустовалова М.Л., Равлина Е.А.,
Акуленко Е.С. (RU)**

(56) EP-A1-1340910
US-A1-20100283252
WO-C2-2007086930

(57) Изобретение относится к ветроэнергетике и может быть использовано для создания и модификации ветроэнергетических установок с целью повышения эффективности их работы в широком диапазоне ветровых режимов, в том числе при низких значениях среднегодовой скорости ветра (3-6 м/с). Управление ветроэнергетической установкой осуществляется при помощи регулируемой системы отбора мощности ветродвигателя, состоящей из синхронного электрического генератора на постоянных магнитах с датчиком положения ротора, активного выпрямителя с микропроцессорным контроллером, блока питания, системы торможения, балластной нагрузки и понижающего преобразователя. Для данной структуры ВЭУ реализован способ регулирования, обеспечивающий повышение коэффициента преобразования энергии ветра во всем диапазоне рабочих скоростей и стабилизирующий электромагнитный момент на валу генератора при скорости ветра выше расчетной, соответствующей номинальному значению мощности. Способ регулирования основан на управлении частотой вращения ветродвигателя в соответствии с алгоритмом поиска оптимальной частоты вращения, который оценивает изменение вырабатываемой энергии на заданном интервале времени и производит задание нового значения частоты вращения.

B1

034889

034889

B1

Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится к ветроэнергетике и может быть использовано для создания и модификации ветроэнергетических установок (ВЭУ) с целью повышения эффективности их работы.

Уровень техники

В документе US 4525633 представлен метод управления и устройство, его реализующее. В основе метода лежит выход на оптимальное соотношение частоты вращения и скорости ветра при помощи датчика скорости ветра и системы преобразования энергии ветровой установки. Недостатком данной конструкции является необходимость применения датчика скорости ветра, который либо не обладает достаточной точностью, либо имеет высокую стоимость, при этом является дополнительным источником возможных неисправностей.

В документе US 4695736 представлен метод управления и реализующая его структура ВЭУ. В основе метода лежит регулирование крутящего момента в соответствии с графиком, определяющим скорость генератора по отношению к измеренной генерируемой мощности, с целью повышения эффективности ветровой установки. Таким образом, если оптимальная частота вращения лежит ниже фактической, то частота, соответствующая мощности, будет ниже фактической и формируется задание по току (моменту) в сторону снижения частоты вращения. При оптимальной частоте выше фактической мощность будет соответствовать большей частоте вращения и ветродвигатель будет разгоняться. Недостатком данного метода является необходимость использования предварительно заданного графика, априори отличающегося от фактической характеристики работы ветровой установки.

Наиболее близким к заявленному техническому решению является патент US 8242620, который описывает структуру ветроэнергетической установки, предусматривающую использование активного выпрямителя с возможностью регулирования частоты вращения в заданном диапазоне за счет формирования задания по току. Это позволяет стабилизировать частоту вращения и обеспечить эффективную работу ВЭУ при определенных скоростях ветра, соответствующих частоте вращения ветродвигателя.

Недостатком прототипа является низкая эффективность работы ВЭУ в широком диапазоне ветровых режимов.

Сущность изобретения

Задачей данного изобретения является повышение эффективности работы ВЭУ в широком диапазоне ветровых режимов, в том числе при низких значениях среднегодовой скорости ветра (3-6 м/с).

Технический результат заявленного изобретения заключается в повышении коэффициента преобразования энергии ветра во всем диапазоне рабочих скоростей ВЭУ.

Технический результат заявленного изобретения достигается за счет того, что способ регулирования отбора мощности ветродвигателя, включающий управление частотой вращения ветродвигателя во всем диапазоне рабочих скоростей ветра в соответствии с алгоритмом поиска оптимальной частоты вращения, который оценивает изменение вырабатываемой энергии на заданном интервале времени при изменении частоты вращения и производит задание нового значения частоты вращения на основе полученных значений, а при скорости ветра выше расчетной, соответствующей номинальному значению мощности, обеспечивает стабилизацию электромагнитного момента на валу синхронного электрического генератора, при этом управление частотой вращения во всем диапазоне рабочих скоростей ветра осуществляют системой отбора мощности ветродвигателя, состоящей из синхронного электрического генератора на постоянных магнитах с датчиком положения ротора, установленного на одном валу с ветродвигателем; собственного блока питания электронных устройств, подключенного непосредственно к выходу электрической машины; активного выпрямителя с векторным управлением микропроцессорным программируемым контроллером, обеспечивающих возможность задания электромагнитного момента путем формирования синусоидальных синфазных с ЭДС токов заданной амплитуды в фазных обмотках генератора и преобразующих их на выходе активного выпрямителя в ток зарядки конденсатора звена постоянного тока с напряжением больше заданного потребителем выходного напряжения, при этом стабилизация напряжения в заданном диапазоне значений обеспечивается понижающим преобразователем под управлением микропроцессорного контроллера при полном отборе выходной мощности потребителем, а при невозможности полного отбора мощности потребителем обеспечивается совместной работой понижающего преобразователя и балластной нагрузки под управлением микропроцессорного контроллера; работающего под управлением микропроцессорного контроллера понижающего преобразователя, поддерживающего напряжение в звене постоянного тока между активным выпрямителем и понижающим преобразователем в заданном диапазоне значений, а также понижающего выходное напряжение до требуемого потребителем уровня и ограничивающего максимальную величину тока для защиты от короткого замыкания; балластной нагрузки для отвода избытка электроэнергии под управлением микропроцессорного контроллера; системы торможения, связанной с обмотками синхронного электрического генератора, которая под управлением микропроцессорного контроллера производит ступенчатое торможение синхронного электрического генератора или аварийную остановку ВЭУ.

В частном случае реализации заявленного способа регулирования отбора мощности ветродвигателя предусмотрена балластная нагрузка с ШИМ коммутацией, что позволяет плавно регулировать мощность, снимаемую БН, и уменьшать напряжение на конденсаторе до допустимого уровня, не прерывая работу

ПП и передачу энергии на потребителя.

В частном случае реализации заявленного способа регулирования отбора мощности ветродвигателя синхронный электрический генератор (4) имеет дисковую конструкцию с постоянными магнитами с осевой намагниченностью, состоящую из ротора с двумя соосными дисками, расположенными по обе стороны статора и жестко связанными между собой, что позволяет лучше использовать активный объем тороидального статора, уменьшить реакцию якоря и пути магнитного потока, тем самым снизить удельные потери, а также повысить технологичность исполнения синхронного электрического генератора, упростить стыковку с ветродвигателем, при этом использование беспазового кольцевого магнитопровода статора позволяет снизить момент статического сопротивления синхронного электрического генератора и снизить момент страгивания ВЭУ.

Использование регулируемой системы отбора мощности ветродвигателя, состоящей из синхронного электрического генератора на постоянных магнитах с датчиком положения ротора, активного выпрямителя с микропроцессорным контроллером, блока питания, системы торможения, балластной нагрузки и понижающего преобразователя. Для данной структуры ВЭУ реализован способ регулирования, обеспечивающий повышение коэффициента преобразования энергии ветра во всем диапазоне рабочих скоростей и стабилизирующий электромагнитный момент на валу генератора при скорости ветра выше расчетной, соответствующей номинальному значению мощности. Способ регулирования основан на управлении частотой вращения ветродвигателя в соответствии с алгоритмом поиска оптимальной частоты вращения, который оценивает изменение вырабатываемой энергии на заданном интервале времени и производит задание нового значения частоты вращения.

Краткое описание чертежей

Детали, признаки, а также преимущества настоящего изобретения следуют из нижеследующего описания вариантов реализации заявленного способа регулирования отбора мощности ветродвигателя с использованием чертежей, на которых показано следующее.

Фиг. 1 - общая структура ВЭУ.

Фиг. 2 - структура системы отбора мощности ветродвигателя.

Фиг. 3 - алгоритм поиска оптимальной частоты вращения ветродвигателя.

Фиг. 4.1 - функциональная схема регулятора частоты вращения.

Фиг. 4.2 - функциональная схема управления активным выпрямителем.

На фигурах цифрами обозначены следующие позиции:

1 - ветродвигатель;

2 - система отбора мощности;

3 - потребитель вырабатываемой электроэнергии;

4 - синхронный электрический генератор;

5 - датчик положения ротора;

6 - блок питания;

7 - микропроцессорный контроллер;

8 - система торможения;

9 - активный выпрямитель;

10 - балластная нагрузка;

11 - понижающий преобразователь;

позициями 12-20 обозначены блоки алгоритма работы системы регулирования отбора мощности ветродвигателя;

позициями 21-23 - блоки функциональной схемы регулятора частоты вращения;

позициями 24-30 - блоки функциональной схемы управления активным выпрямителем.

Раскрытие изобретения

На фиг. 1 представлена общая структура ветроэнергетической установки, состоящей из ветродвигателя (1), соединенного с системой регулирования отбора мощности (2), передающей вырабатываемую электроэнергию потребителю (3).

Ветродвигатель (1) создает крутящий момент M_B на валу в соответствии со своими характеристиками и характеристиками ветрового потока. Система отбора мощности ветродвигателя (2) генерирует на валу электромагнитный момент $M_Э$, преобразуя механическую энергию ветродвигателя (1) в электроэнергию требуемого для потребителя (3) напряжения U_n и тока I_n . В качестве потребителя (3) может рассматриваться аккумуляторная батарея заданного напряжения или сетевой инвертор.

На фиг. 2 представлена структура системы отбора мощности ветродвигателя (ВД), состоящей из синхронного электрического генератора (СГ) (4) с датчиком положения ротора (ДПР) (5), установленного на одном валу с ВД, с подсоединенным на выходе СГ блоком питания (БП) (6). Микропроцессорный контроллер (МПК) (7) управляет работой соединенной с обмотками СГ системы торможения (СТ) (8); работой активного выпрямителя (АВ) (9) с подключенными на входе датчиками фазных токов DT_A , DT_B , DT_C и подключенными на выходе датчиком напряжения ДН, конденсатором C_0 , датчиком тока $DT1$; работой балластной нагрузки (БН) (10) и понижающего преобразователя (ПП) (11) с датчиком тока $DT2$ на выходе.

Система отбора мощности ветродвигателя включает в себе силовые, измерительные и управляющие устройства, основным назначением которых является управление частотой вращения ветродвигателя в соответствии с алгоритмом поиска оптимальной частоты вращения, который оценивает изменение вырабатываемой энергии и производит задание нового значения частоты вращения.

Решение задачи повышения коэффициента преобразования энергии ветра для широкого диапазона значений скоростей ветра обеспечивается возможностью

задавать электромагнитный момент M_{Σ} на валу синхронного электрического генератора, пропорциональный линейному значению величины тока синхронного электрического генератора, определяемому фазными токами i_A, i_B, i_C , формируемыми активным выпрямителем с векторным управлением от микропроцессорного программируемого контроллера в соответствии с разработанными алгоритмами;

задавать в обмотках синхронного электрического генератора токи i_A, i_B, i_C - синусоидальной формы, совпадающие по фазе с ЭДС генератора, без дополнительных гармонических составляющих, тем самым повышать КПД во всем диапазоне рабочих частот вращения;

реализовывать активным выпрямителем функции повышающего конвертора, работающего совместно с понижающим преобразователем, обеспечивая при этом величину напряжения U_{in} больше U_n и требуемые значения U_n и I_n . Таким образом, появляется возможность применять синхронный электрический генератор с большим значением КПД.

Микропроцессорный программируемый контроллер реализует векторное управление активным выпрямителем, формируя широтно-импульсно модулируемые (ШИМ) сигналы PWM1 в соответствии со значением угла поворота α ротора синхронного электрического генератора. Значение угла поворота ротора α определяется по показаниям датчика положения ротора.

Датчик положения ротора предназначен для реализации векторного управления активным выпрямителем и вычисления скорости вращения ротора синхронного электрического генератора. Точное определение положения ротора с малым временным запаздыванием при векторном управлении с датчиком положения ротора улучшает динамические характеристики синхронного электрического генератора и обеспечивает полную управляемость, что необходимо для эффективной работы алгоритмов регулирования работы ВЭУ.

Обратная связь по контуру тока организована с применением датчиков тока ДТА, ДТВ, ДТС.

Блок питания, подключенный непосредственно к выходу синхронного электрического генератора, обеспечивает низковольтное питание электронных устройств.

Система торможения производит ступенчатую остановку синхронного электрического генератора по команде микропроцессорного программируемого контроллера при превышении порогового значения напряжения U_{in} или аварийную остановку ВЭУ в случае выхода из строя одного из устройств системы отбора мощности ВД.

Понижающий преобразователь поддерживает напряжение в звене постоянного тока на конденсаторе C_0 между активным выпрямителем и понижающим преобразователем в заданном диапазоне значений U_{in} по показаниям датчика напряжения ДН за счет регулирования тока I_n по показаниям датчика тока ДТ1 и тока I_n по показаниям датчика тока ДТ2 сигналами PWM3 и PWM2 микропроцессорного программируемого контроллера. Понижающий преобразователь понижает напряжение до требуемого уровня U_n и позволяет ограничить максимальную величину тока I_n , чем обеспечивает защиту от короткого замыкания.

Балластная нагрузка мощностью не менее номинальной мощности синхронного электрического генератора под управлением микропроцессорного программируемого контроллера отводит избыток электроэнергии в случае превышения заданного значения U_{in} .

Заявленный способ регулирования отбора мощности ветродвигателя обеспечивает повышение коэффициента преобразования энергии ветра во всем диапазоне рабочих скоростей ВЭУ и стабилизирует электромагнитный момент на валу генератора при скорости ветра выше расчетной, соответствующей номинальному значению мощности. Способ регулирования основан на управлении частотой вращения ветродвигателя в соответствии с алгоритмом поиска оптимальной частоты вращения, который оценивает изменение вырабатываемой энергии на заданном интервале времени и производит задание нового значения частоты вращения.

Система отбора мощности реализует три основных режима работы.

1. Режим работы в диапазоне значений скорости ветра от минимальной рабочей до расчетной, при которой СГ вырабатывает номинальную мощность.

В диапазоне частот вращения от минимальной рабочей до номинальной при поступлении ШИМ сигналов PWM1 на АВ с МПК производится коммутация обмоток СГ. При этом формируются синусоидальные синфазные с ЭДС токи заданной амплитуды в фазах генератора i_A, i_B, i_C , что обеспечивает минимизацию потерь в обмотках СГ и формирование оптимальной частоты вращения на валу СГ в соответствии с разработанным алгоритмом. Синфазность и синусоидальность токов обеспечивается векторным управлением по показаниям ДПР. Активный выпрямитель преобразует ЭДС СГ и переменные фазные токи i_A, i_B, i_C в постоянный выходной ток I_n с напряжением U_{in} на конденсаторе C_0 .

При полном отборе выходной мощности потребителем стабилизация напряжения U_{in} на конденса-

торе C_0 в заданном диапазоне значений обеспечивается ПП за счет регулирования тока I_n по показаниям ДТ2 модулированным ШИМ сигналом PWM3 МПК.

При невозможности полного отбора мощности потребителем (I_n ограничен потребителем) стабилизация напряжения U_{in} на конденсаторе C_0 в заданном диапазоне значений обеспечивается совместной работой ПП и БН. Регулирование тока I_n по показаниям ДТ2 производится модулированными ШИМ сигналами PWM3 и PWM2 с МПК с подключением БН.

2. Режим работы в диапазоне значений скорости ветра, превышающих расчетную.

При значении скорости ветра, превышающей расчетную величину скорости ветра ВЭУ, ВД создает крутящий момент на валу M_B , превышающий номинальное значение электромагнитного момента M_3 синхронного электрического генератора. Частота вращения СГ становится выше номинальной, и АВ начинает работать в режиме диодного моста. В этом случае величина электрической мощности, поступающей с выхода АВ, превышает номинальное значение и ПП не способен стабилизировать напряжение U_{in} на конденсаторе C_0 . При достижении на конденсаторе C_0 порогового значения напряжения U_{in} с МПК формируется ШИМ сигнал PWM2, который подключает балластную нагрузку и по показаниям ДТ1 формирует ток I_{in} на выходе АВ, чем создает номинальный электромагнитный момент M_3 . В случае если созданный момент M_3 превышает M_B , действующий на валу СГ и ВД, частота вращения снижается и ВЭУ переходит в режим работы 1.

В случае если созданный момент M_3 недостаточно для торможения СГ, частота вращения СГ увеличивается, возрастает ЭДС СГ и по показаниям ДН МПК передает сигнал $s1$ на СТ, после чего СТ производит ступенчатое торможение СГ и ВД. В процессе срабатывания СТ прекращается формирование токов АВ и зарядка конденсатора C_0 , при этом ПП продолжает выработку электроэнергии, что приводит к снижению напряжения U_{in} на ДН ниже заданного значения. После срабатывания СТ обмотки синхронного генератора остаются закороченными до тех пор, пока напряжение не понизится ниже заданного значения, после чего ВЭУ переходит в режим работы 2 с балластной нагрузкой.

3. Аварийный режим работы ВЭУ в случае выхода из строя одного из устройств системы отбора мощности ВД. В этом случае СТ производит остановку ВЭУ.

На фиг. 3 представлен алгоритм поиска оптимальной частоты вращения ветродвигателя. Алгоритм основан на поиске оптимальной частоты вращения по изменению усредненного значения вырабатываемой энергии на заданном интервале времени. Блок (12) задает начальные параметры: E_n - суммарная "энергия", полученная на прошлой итерации цикла, w_{n-1} - задаваемая частота вращения на прошлой итерации цикла, w_{req} - задаваемая частота вращения на данной итерации цикла, k - число проходов цикла. В блоке (13) сравнивается число проходов с заданным предельным значением. Блок (14) задает задержку времени на цикл. Блок (15) выдает значения q составляющих по напряжению U_q и току I_q . Блок (16) добавляет к значению суммарной "энергии" E_n значение на данной итерации цикла. Понятие "энергия" в данном случае применяется с оговоркой, так как суммируются мгновенные значения мощности для амплитудных значений тока и напряжения одной фазы и суммарная величина, не равная реальной выработанной энергии генератора, но всегда пропорциональная ей с одинаковым коэффициентом. Таким образом, полученные значения "энергии" можно корректно сравнивать между собой, что и применяется в данном алгоритме. Блок (17) увеличивает счетчик проходов и при достижении предельного значения выполняется блок (18), сравнивающий произведение изменения "энергии" и частоты вращения между прошлой и нынешней итерацией с нулем. Значение больше нуля означает, что частота вращения повысилась и значение "энергии" возросло, либо частота вращения снизилась и значение "энергии" также снизилась, следовательно, требуется повысить частоту вращения, что выполняется блоком (19). Значение меньше нуля означает, что частота вращения снизилась, а значение "энергии" возросло, либо частота вращения повысилась, а значение "энергии" снизилось, следовательно, требуется снизить частоту вращения ветродвигателя, что выполняет блок (20).

На фиг. 4.1 приведена функциональная схема регулятора частоты вращения. Реализована схема векторного управления. Сумматор (21) вычисляет разность заданного значения частоты вращения w_{req} и фактического w_{got} , значение разности поступает на блок (22), являющийся ПИ-регулятором. Блок (23) обеспечивает ограничение задания тока I_{q_req} в пределах от нуля до номинального значения электрической машины, чтобы избежать перевода ее в двигательный режим и не превысить допустимое значение тока.

На фиг. 4.2 приведена функциональная схема управления активным выпрямителем. Значения измеренных фазных токов поступают на блок (24), реализующий преобразование Парка-Кларка. Полученные значения $d-q$ составляющих поступают на блоки (25) и (26), в которых из фактических значений вычитаются заданные и преобразуются ПИД регуляторами (27), (28). В блоке (29) восстанавливаются значения задания по каждой фазе и на их основе в блоке (30) формируются управляющие импульсы, поступающие на активный выпрямитель.

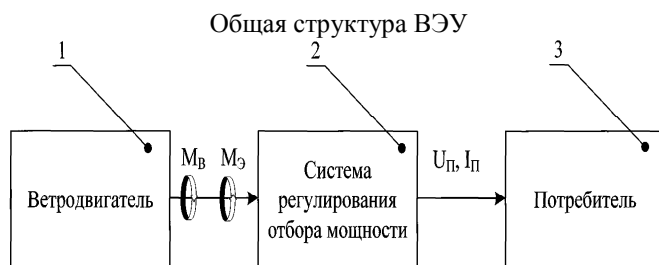
ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ регулирования отбора мощности ветродвигателя, включающий управление частотой вращения ветродвигателя во всем диапазоне рабочих скоростей ветра в соответствии с алгоритмом поис-

ка оптимальной частоты вращения, который оценивает изменение вырабатываемой энергии на заданном интервале времени при изменении частоты вращения и производит задание нового значения частоты вращения на основе полученных значений, а при скорости ветра выше расчетной, соответствующей номинальному значению мощности, обеспечивает стабилизацию электромагнитного момента на валу синхронного электрического генератора, при этом управление частотой вращения во всем диапазоне рабочих скоростей ветра осуществляют системой отбора мощности ветродвигателя, состоящей из синхронного электрического генератора на постоянных магнитах с датчиком положения ротора, установленного на одном валу с ветродвигателем; собственного блока питания электронных устройств, подключенного непосредственно к выходу электрической машины; активного выпрямителя с векторным управлением микропроцессорным программируемым контроллером, обеспечивающих возможность задания электромагнитного момента путем формирования синусоидальных синфазных с ЭДС токов заданной амплитуды в фазных обмотках генератора и преобразующих их на выходе активного выпрямителя в ток зарядки конденсатора звена постоянного тока с напряжением больше заданного потребителем выходного напряжения, при этом стабилизация напряжения в заданном диапазоне значений обеспечивается понижающим преобразователем под управлением микропроцессорного контроллера при полном отборе мощности потребителем, а при невозможности полного отбора мощности потребителем обеспечивается совместной работой понижающего преобразователя и балластной нагрузки под управлением микропроцессорного контроллера; работающего под управлением микропроцессорного контроллера понижающего преобразователя, поддерживающего напряжение в звене постоянного тока между активным выпрямителем и понижающим преобразователем в заданном диапазоне значений, а также понижающего выходное напряжение до требуемого потребителем уровня и ограничивающего максимальную величину тока для защиты от короткого замыкания; балластной нагрузки для отвода избытка электроэнергии под управлением микропроцессорного контроллера; системы торможения, связанной с обмотками синхронного электрического генератора, которая под управлением микропроцессорного контроллера производит ступенчатое торможение синхронного электрического генератора или аварийную остановку ВЭУ.

2. Способ регулирования отбора мощности ветродвигателя по п.1 отличающийся тем, что система дополнительно содержит балластную нагрузку с широтно-импульсно модулируемой коммутацией.

3. Способ регулирования отбора мощности ветродвигателя по п.1 отличающийся тем, что синхронный электрический генератор (4) выполнен дисковой конструкцией с постоянными магнитами с осевой намагниченностью, состоящей из ротора с двумя соосными дисками, расположенными по обе стороны статора и жестко связанными между собой.

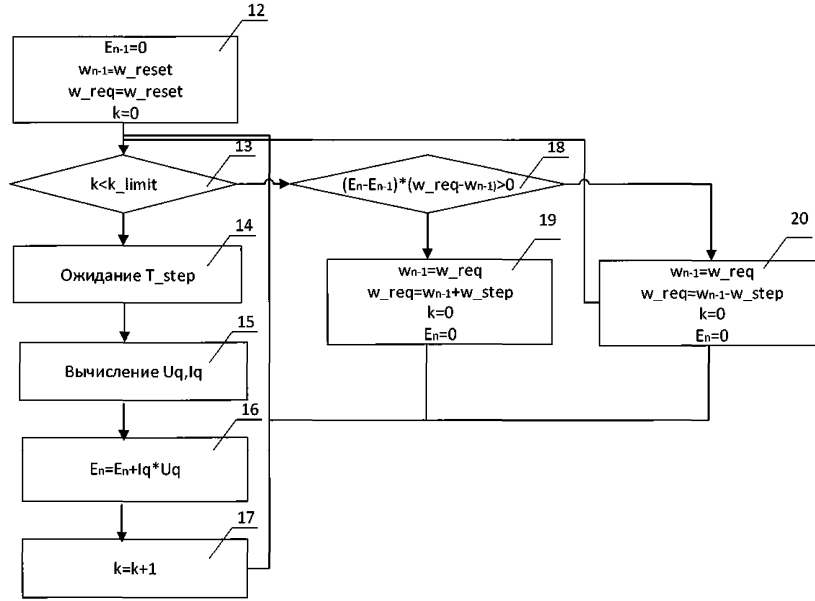


Фиг. 1



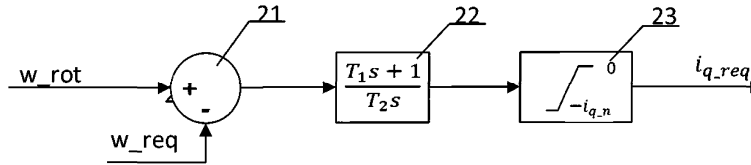
Фиг. 2

Алгоритм поиска оптимальной частоты вращения ветродвигателя



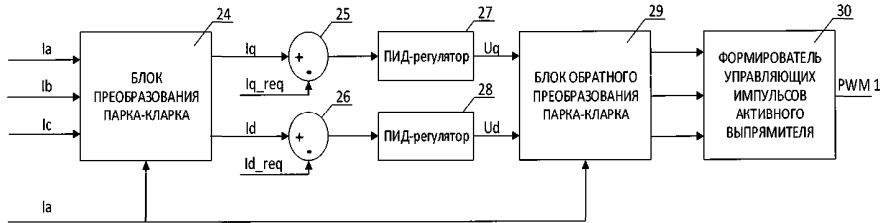
Фиг. 3

Функциональная схема регулятора частоты вращения



Фиг. 4.1

Функциональная схема управления активным выпрямителем



Фиг. 4.2

