

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.311.001.57:621.314

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-102-116>

Автоматическая настройка регуляторов частоты и обменной мощности в энергосистемах малой мощности

Александр Георгиевич Фишов^{1✉}, Анатолий Анатольевич Осинцев²,
Михаил Юрьевич Фролов³, Денис Владимирович Армеев⁴,
Инна Сергеевна Мурашкина⁵

¹⁻⁵Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

¹fishov@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0002-5712-064X>

²osincev@corp.nstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0001-8373-3493>

³myu.frolov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0003-4408-0316>

⁴armeev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0002-2128-9590>

⁵murashkinainna@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0124-1071>

Резюме. Цель – разработка алгоритмов самонастройки регулятора мощности в режиме нормальной эксплуатации энергоблоков локальных энергосистем с малой синхронной генерацией, способных работать как в автономном режиме, так и в параллельном режиме с внешней электрической сетью. Настройка регулятора мощности энергоблока происходит в ходе нормальной эксплуатации по показателям качества регистрируемых переходных процессов при нескольких коммутациях нагрузок с вариацией коэффициента усиления. Корректировка коэффициентов усиления по каждому из каналов регулирования осуществляется в результате его оптимизации по функции, аппроксимирующей зависимость показателя качества переходного процесса от значения коэффициента усиления с учетом разнохарактерности процессов и разномасштабности возмущений режима при набросе/сбросе мощности. В качестве показателя качества процесса используется сумма взвешенных значений переключения и продолжительности процесса. Благодаря адаптации, с течением времени регулятор автоматически настраивается и качество регулирования повышается. Представлены алгоритмы самонастройки регулятора мощности при регулировании частоты в режиме изолированной работы и для регулирования обменного перетока в режиме параллельной работы MiniGrid. В отличие от самонастройки регулятора частоты, при самонастройке регулятора обменного перетока мощности по переходным функциям, связанным с коммутациями нагрузок, алгоритмом производится фильтрация высокочастотных изменений мощности в результате электромеханических колебаний. Приводятся результаты моделирования процессов самонастройки регулятора мощности для простейшей схемы с одним генератором, подтверждающие работоспособность и эффективность представленных метода и алгоритмов. Предложенный метод самонастройки регуляторов частоты и обменного перетока является перспективным для технологической доработки и использования в системах регулирования мощности MiniGrid.

Ключевые слова: малая генерация, энергосистемы малой мощности, настройка регуляторов частоты и мощности, энергосистема, синхронные генераторы

Для цитирования: Фишов А. Г., Осинцев А. А., Фролов М. Ю., Армеев Д. В., Мурашкина И. С. Автоматическая настройка регуляторов частоты и обменной мощности в энергосистемах малой мощности // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 102–116. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-102-116>.

Automatic tuning of frequency and interchange power controllers in low-power energy systems

Alexander G. Fishov^{1✉}, Anatoly A. Osintsev², Mikhail Yu. Frolov³,
Denis V. Armeev⁴, Inna S. Murashkina⁵

¹⁻⁵Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

¹fishov@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0002-5712-064X>

²osintsev@corp.nstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0001-8373-3493>

³myu.frolov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0003-4408-0316>

⁴armeev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0002-2128-9590>

⁵murashkinainna@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0124-1071>

Abstract. The present work discusses the development of algorithms for power controller autotuning under normal operation in power units of local energy systems having low synchronous generation, which can operate in stand-alone and parallel mode with the external power grid. The power controller of a power unit is tuned in the course of routine operation following the quality indicators of recorded transients under several load commutations upon a varying amplification factor. The amplification factor for each control channel is optimised by a function that approximates the dependence of the transient characteristics on the value of this factor, including the diversity of processes and mode disturbances during power surge/shedding. The sum of weighted overshoot and process duration values is used as a process quality indicator. Owing to adaptation, the controller automatically tunes itself over time, and the control quality improves. This article presents algorithms for autotuning the power controller when regulating frequency and interchange overcurrent under isolated and parallel operation mode of the MiniGrid, respectively. Unlike frequency controller, when the interchange overcurrent controller is autotuned by transient functions associated with load commutations, the algorithm filters out high-frequency power variations resulting from electromechanical oscillations. The simulation results of autotuning the power controller for an elementary scheme, having one generator, confirm the efficiency of the presented method and algorithms. The proposed method of autotuning frequency and interchange overcurrent controllers appears promising for technological enhancement and use in MiniGrid power control systems.

Keywords: small generation, MiniGrid, adjustment of frequency and power controllers, power system, synchronous generators

For citation: Fishov A. G., Osintsev A. A., Frolov M. Yu., Armeev D. V., Murashkina I. S. Automatic tuning of frequency and interchange power controllers in low-power energy systems. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):102-116. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-102-116>.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных трендов развития электроэнергетики являются децентрализация производства электроэнергии и, соответственно, управления режимами электрических сетей с распределенной малой генерацией. На передний план выходят в целом сбалансированные энергосистемы малой мощности (MiniGrid)⁶ [1–3], способные работать как параллельно с внешней энергосистемой в составе распределительных электрических сетей, так и автономно, что позволяет значительно повысить экономичность

режимов электростанций малой мощности и надежность энергосистемы в целом, особенно за счет ее живучести при системных авариях.

Для электростанций малой мощности существует множество причин, определяющих необходимость автоматической настройки их регуляторов частоты и обменного перетока:

– проектирование и определение настроек автоматики, в т.ч. регуляторов, осуществляются в условиях большей неопределенности по отношению к обычным электростанциям;

⁶Разработка целевой модели (прототипа) Mini/MicroGrid // Вести в электроэнергетике. 2021. № 3. С. 2–11. [Электронный ресурс]. URL: https://www.eriras.ru/files/razrabotka_tselevoy_modeli_prototipa_minimicrogrid.pdf (15.09.2021).

- в процессе эксплуатации оперативно могут меняться точки присоединения к внешней сети для режима параллельной работы;

- собственные нагрузки MiniGrid изменяются по составу и в широком диапазоне мощности;

- состав и структура включенных генерирующих мощностей также меняются в широком диапазоне;

- квалификация персонала электростанций не позволяет самостоятельно выбирать и изменять настройки регуляторов.

Среди первых работ по автоматической настройке регуляторов следует выделить [4], где Дж. Г. Циглером и Н. Б. Никольсом в 1942 г. была предложена простая методика расчета параметров пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов, которая, безусловно, дает не самые лучшие результаты. Несмотря на это, она до сих пор часто используется на практике, хотя в последующем появилось множество более эффективных методов. Дж. Г. Циглер и Н. Б. Никольс предложили два метода настройки ПИД-регуляторов. Один из них основан на параметрах отклика объекта на единичный скачок, второй – на частотных характеристиках объекта управления.

Существующие аналитические методы настройки регуляторов, как правило, основаны на аппроксимации динамики объекта моделью первого или второго порядка с задержкой. Причиной этого является невозможность аналитического решения систем уравнений при использовании моделей более высокого порядка. В последние годы, в связи с появлением мощных контроллеров и персональных компьютеров, получили развитие и популярность численные методы оптимизации. Они являются гибким инструментом для настройки параметров регулятора для моделей любой сложности и позволяют учитывать нелинейности объекта управления и требования к робастности [6–21].

В отличие от классических систем регулирования, где, как правило, стремятся добиться высокой статической и динамической точности регулирования, быстродействия, поддержание баланса активной мощности в MiniGrid в автономном режиме осуществля-

ется за счет регулирования частоты, а при параллельной работе с внешней сетью – посредством регулирования обменного перетока. При этом в регуляторах частоты и мощности электростанций приходится учитывать негативное влияние указанных параметров на экономичность выработки электроэнергии и ресурс генерирующего оборудования. Можно говорить о необходимости достаточного и мягкого регулирования. Для этого специально вводятся «мертвые полосы» по частоте и обменной мощности, требуемое время регулирования исчисляется десятками секунд, а, например, допустимое динамическое отклонение частоты при работе в автономном режиме достигает нескольких Гц.

Примером системы регулирования мощности электростанции MiniGrid может служить ее реализация в пилотном проекте, представленная в [5], где:

1. В автономном режиме частота контролируется регуляторами скорости по пропорционально-интегральному (PI) закону, обеспечивающему полное восстановление номинальной частоты после восстановления баланса мощности регулятором.

2. В режиме параллельной работы регулятор частоты использует только пропорциональное регулирование, т.к. обеспечить стабилизацию частоты в Единой энергетической системе России энергоблоками малой мощности не получится, а работа PI-регулятора за счет интегрального канала будет приводить к полной загрузке или разгрузке энергоблока при отклонениях частоты.

3. Регулирование перетока по PI-закону, как уже отмечалось, нецелесообразно, однако такой режим может использоваться в некоторых специальных случаях, и автоматическая настройка регуляторов для этого режима вполне возможна. Более целесообразна коррекция загрузки энергоблоков при выходе обменной мощности из диапазона заданного коридора («мертвой полосы»), представляющая собой ступенчатую загрузку или разгрузку энергоблоков, причем регулированием в полном понимании этого слова она не является, а также не несет угрозы возникновения самораскачивания режима из-за неудачных коэффициентов регулирования обмен-

ной мощности.

4. При нескольких включенных на параллельную работу генераторах осуществляется групповое регулирование мощности с назначением ведущего и прочих ведомых генераторов.

5. При аварийном отключении или отказе регуляторов ведущего генератора осуществляется автоматическое переназначение ведущего генератора.

6. При автонастройке регуляторов мощности контролируется возникновение самораскачивания с его прерыванием путем снижения коэффициентов усиления регуляторов.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ САМОНАСТРАИВАЮЩИХСЯ РЕГУЛЯТОРОВ ЧАСТОТЫ И ОБМЕННОГО ПЕРЕТОКА И ОБЩАЯ ИДЕЯ МЕТОДА

Рассмотрим требования к регулированию частоты в автономном режиме MiniGrid и при ее параллельной работе с внешней энергосистемой.

Для автономного режима MiniGrid существуют требования по ширине зоны нечувствительности регуляторов скорости вращения ($50 \pm 0,075$ Гц), астатичности характеристики регулирования и быстродействия, определяемого динамическими характеристиками двигателей энергоблоков и ресурсными ограничениями их работоспособности. Соответственно этим требованиям, регуляторы могут не участвовать в регулировании при малых колебаниях частоты, должны ограничивать ее колебания при набросах/сбросах мощности генераторов, восстанавливать частоту после возмущений, ограничивать увеличение частоты (скорости вращения вала) при отключении нагруженного энергоблока.

В режиме параллельной работы система регулирования частоты и мощности MiniGrid должна обеспечивать выполнение требований [5] по участию энергоблоков в общем первичном регулировании. Соответственно этим требованиям, регулирование перетока по внешним связям должно обеспечиваться при выходе частоты из мертвой полосы регулирования частоты ($50 \pm 0,075$ Гц) с требуемыми статизмом и динамическими характе-

ристиками во всем диапазоне располагаемой мощности энергоблоков.

Рассмотрим два основных способа использования обменного перетока мощности с внешней энергосистемой по связям в режиме параллельной работы:

1) регулирование перетока для поддержания заданного значения;

2) работа без регулирования с удержанием перетока внутри допустимого коридора его значений (использование корректировок мощности генерирующего оборудования только при выходе обменного перетока за разрешенные границы).

Сразу следует отметить, что работа MiniGrid в режиме регулирования перетока обменной мощности с поддержанием заданного значения практически нивелирует основные положительные эффекты от параллельной работы, т.к. поддержание динамического баланса генерации и потребления требует интенсивной работы регуляторов мощности. Интенсивность этого регулирования, в отличие от работы регуляторов частоты в автономном режиме, значительно выше, т.к. в последнем случае небалансы мощности, имеющиеся при колебаниях частоты, частично демпфируются вращающимися массами генерирующего оборудования. В результате генераторы работают в режимах переменной нагрузки, что снижает их экономические и ресурсные показатели.

Работа в коридоре при его достаточной ширине позволяет реализовать основные преимущества параллельной работы.

Для удовлетворения требований к качеству регулирования частоты и перетоков мощности MiniGrid достаточно использовать закон PI-регулирования, в котором канал по отклонению способен обеспечить требуемое быстродействие регулирования, а по интегралу – его астатический характер. При этом требуемое качество регулирования может обеспечиваться оптимальным соотношением коэффициентов по отклонению и интегралу отклонения выходного параметра.

В данной работе предлагается и исследуется способ самонастройки регуляторов частоты и обменного перетока мощности MiniGrid путем минимизации компромиссной

целевой функции F из взвешенных нормализованных значений перерегулирования и продолжительности регулирования выходного параметра для нескольких ординарных возмущений баланса мощности коммутационного характера, т.е. на основе показателей их переходных характеристик:

$$F = C_1 \times \Delta X + C_2 \times T_{\text{рег}} \rightarrow \min,$$

где C_1 , C_2 – весовые коэффициенты, задаваемые технологом; ΔX – нормализованное перерегулирование выходного параметра; $T_{\text{рег}}$ – нормализованная длительность регулирования выходного параметра.

Нарушение баланса мощности вследствие включения/отключения нагрузки, отключения нагруженных генераторов является для MiniGrid частыми событиями, поэтому получение переходных характеристик при эксплуатации не вызывает сложностей, однако следует иметь в виду, что нелинейность объекта вызывает несимметрию переходных характеристик при набросах/сбросах мощности, а также их разномасштабность, зависящую от величины наброса/сброса мощности.

На рис. 1, 2 представлены переходные характеристики (переходные процессы изменения частоты в MiniGrid с PI-регулированием частоты) для одномашинной MiniGrid при ее моделировании в Simulink.

На рис. 1 можно увидеть несимметрию процессов (отличие в характере и параметрах, в т.ч. величине клевка, перерегулирования, времени его максимального возникновения) при набросе мощности (на интервале 0–30 с) и ее сбросе (на интервале 30–60 с).

Сравнение рис. 1 и 2, процессы которых отличаются величиной возмущения, позволяет увидеть и сделать вывод об их качественном подобии и количественном отличии (разномасштабности).

Учет разномасштабности процессов может быть произведен приведением характерных параметров процесса при набросе/сбросе мощности ΔP_i к принятому базовому процессу при набросе/сбросе мощности ΔP_0 :

$$\Delta X_{i \text{ прив}} = \Delta X_i \times \Delta P_0 / \Delta P_i.$$

Учет разнохарактерности процессов может быть произведен дополнительным приведением характерных параметров процесса к принятому базовому процессу при отличии типа процесса от базового, причем приведение осуществляется индивидуально к каждому из параметров (клевков, перерегулирование, длительность процесса):

$$\Delta X_{i \text{ прив}} = \Delta X_{i \text{ прив}} \times \Delta X_0 / \Delta X_{i \text{ прив}},$$

где ΔX_0 – параметр базового процесса.

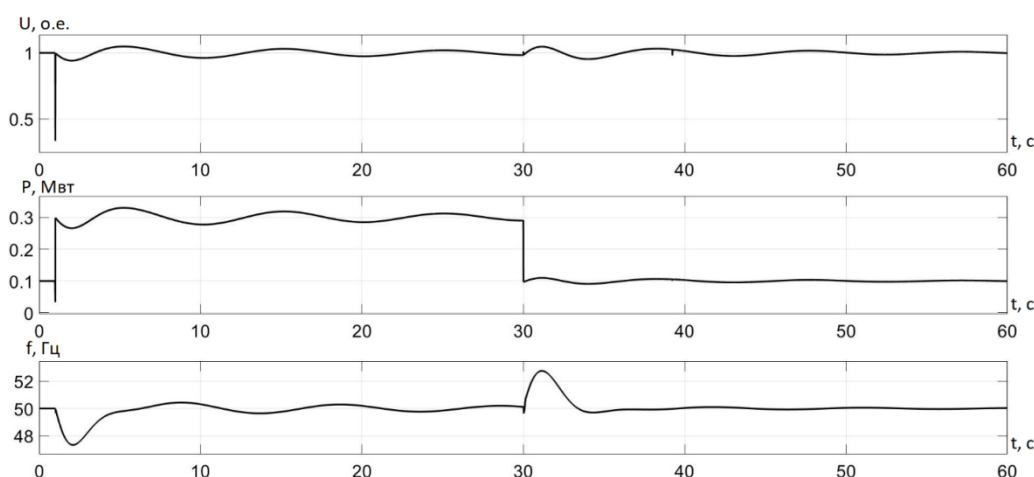


Рис. 1. Переходные процессы в автономном режиме MiniGrid при набросе/сбросе мощности нагрузки 200 кВт (верхний процесс – напряжение, средний – мощность, нижний – частота)

Fig. 1. Transients in the off-line mode of the MiniGrid under the load power surge/shedding of 200 kW (the upper process is voltage, the middle one is power, the lower one is frequency)

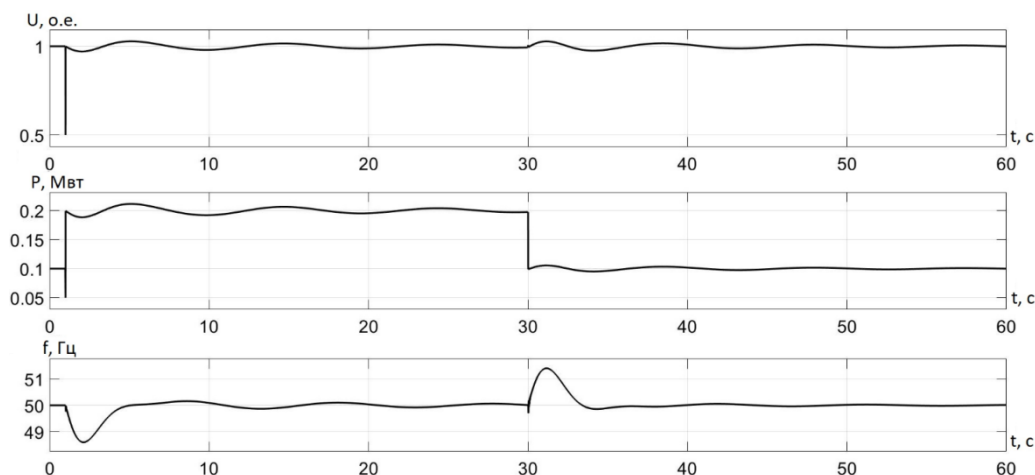


Рис. 2. Переходные процессы в автономном режиме MiniGrid при набросе/сбросе мощности нагрузки 100 кВт
 (верхний процесс – напряжение, средний – мощность, нижний – частота)
 Fig. 2. Transients in the off-line mode of the MiniGrid under the load power surge/shedding of 100 kW (the upper process is voltage, the middle one is power, the lower one is frequency)

АЛГОРИТМЫ АВТОНАСТРОЙКИ PI-РЕГУЛЯТОРОВ

Алгоритм автонастройки регулятора частоты в автономном режиме:

1. Инициализация (задание) начальных коэффициентов усиления по отклонению ($K1$) и интегралу отклонения ($K2$) частоты от уставки регулятора.

2. Определение коэффициентов приведения параметров по трем ординарным процессам для:

а) коэффициента разномасштабности $d1$ процессов при вариации мощности возмущения ($d1 = \Delta P_0 / \Delta P_i$);

б) коэффициентов разнохарактерности процессов $d2$ при включении/отключении нагрузки ($d2 = \Delta X_0 / \Delta X_i \text{ прив.}$).

Для этого для а):

– фиксируется процесс включения нагрузки мощностью, существенно отличной от базовой ΔP_0 ;

– определяется ΔX_i ;

– определяется коэффициент различия масштабов процессов $d1 = \Delta P_0 / \Delta P_i$.

Для б):

– фиксируется процесс включения и отключения нагрузки одинаковой мощности;

– определяется $\Delta X_{1,2}$ и $T_{\text{пер } 1,2}$;

– определяется коэффициент различия параметров включения/отключения $d2 = \Delta X_0 / \Delta X_i \text{ прив.}$

В последующих циклических процессах

все ΔX_i по мере получения масштабируются с учетом показателей характерности и масштабности процессов:

$$\Delta X_{i \text{ прив}} = \Delta X_i \times d1 \times d2.$$

3. Циклическая часть алгоритма:

– фиксируется значимый ординарный процесс, рассчитывается F_i ;

– коэффициент $K1$ уменьшается до $K1/2$;

– фиксируется значимый ординарный процесс, осуществляется приведение параметров, рассчитывается F_{i+1} ;

– если $|(F_{i+1} - F_i)| \leq \Delta F_{\text{значим}}$ настройка $K1$ регулятора не производится, то $K1$ увеличивается до 1,5 $K1$, т.е. до 3 $K1$ текущего;

– фиксируется ординарный процесс, осуществляется приведение параметров, в процессе контролируется затухание колебаний;

– при незатухающих колебаниях $K1$ восстанавливается, $K1$ принимается равным $K1/4$, осуществляется приведение параметров, фиксируется ординарный процесс. По $F(K1/2)$, $F(K1)$, $F(K1/4)$ производится расчет оптимального $K1$ с учетом приведения к базовому процессу и ограничений на зону поиска;

– при затухающих колебаниях по $F(K1/2)$, $F(K1)$, $F(1,5 K1)$ производится расчет оптимального $K1$ с учетом приведений к базовому процессу и ограничений на зону поиска;

– фиксируется ординарный процесс и

проверяется условие повышения качества регулирования:

$$F(K_{\text{опт}}) \leq F_i;$$

– при выполнении верхнего условия K_1 принимается равным $K_{\text{опт}}$.

Далее аналогичный цикл (3) выполняется для K_2 .

Алгоритм автонастройки регулятора перетока мощности в режиме параллельной работы. Переходный процесс изменений перетока мощности имеет две составляющие (рис. 3):

1) достаточно высокочастотных изменений, связанных с возникновением электро-механических колебаний роторов генераторов при набросах/сбросах (для малой генерации ввиду малой электро-механической инерционности энергоблоков частота таких колебаний составляет 0,5–1 Гц);

2) довольно медленных изменений под действием регуляторов мощности (время регулирования десятки с).

При использовании переходной функции для самонастройки регуляторов необходимо отстроиться от изменений мощности в результате электро-механических колебаний, т.е. осуществлять регулирование по средней мощности при наличии высокочастотного электро-механического колебательного процесса.

Алгоритм:

1. Инициализация (задание) начальных коэффициентов усиления K_1 , K_2 регулятора перетока.

2. Определение коэффициентов приведения параметров по трем ординарным процессам для:

с) коэффициента разномасштабности процессов при вариации мощности возмущения ($d1 = \Delta P_0 / \Delta P_i$);

д) коэффициентов разнохарактерности процессов при включении/отключении нагрузки ($d2 = \Delta X_0 / \Delta X_{i \text{ прив}}$).

Для этого для а):

– фиксируется процесс включения нагрузки мощностью, существенно отличной от базовой ΔP_0 ;

– определяется ΔX_i ;

– определяется коэффициент различия масштабов процессов:

$$d1 = \Delta P_0 / \Delta P_i.$$

Для б):

– фиксируется процесс включения и отключения нагрузки одинаковой мощности;

– определяется $\Delta X_{1,2}$ и $T_{\text{пер } 1,2}$;

– определяется коэффициент различия параметров включения/отключения:

$$d2 = \Delta X_0 / \Delta X_{i \text{ прив}}.$$

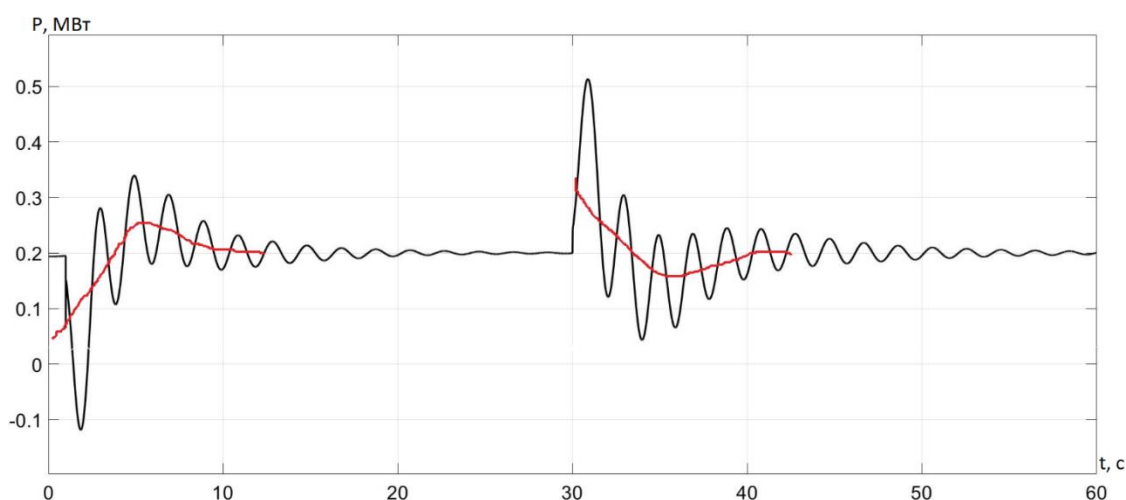


Рис. 3. Переходный процесс для перетока мощности при включении и отключении части нагрузки в MiniGrid и работе PI-регулятора мощности

Fig. 3. Transient process for power flow when switching on and off a part of the load in the MiniGrid and the operation of the PI power controller

В последующих циклических процессах все ΔX_i по мере получения масштабируются с учетом показателей характерности и масштабности процессов:

$$\Delta X_{i \text{ прив}} = \Delta X_i \times d1 \times d2.$$

3. Циклическая часть алгоритма:

- фиксируется значимый ординарный процесс, рассчитывается F_i ;
- коэффициент $K1$ уменьшается до $K1/2$;
- фиксируется значимый ординарный процесс, осуществляется приведение параметров, рассчитывается F_{i+1} ;
- если $|(F_{i+1} - F_i)| \leq \Delta F_{\text{значим}}$ настройка $K1$ регулятора не производится, иначе $K1$ увеличивается до $1,5 K1$, т.е. до $3 K1$ текущего;
- фиксируется ординарный процесс, осуществляется приведение параметров, в процессе контролируется затухание колебаний;
- при незатухающих колебаниях $K1$ восстанавливается, $K1$ принимается равным $K1/4$, осуществляется приведение параметров, фиксируется ординарный процесс. По $F(K1/2)$, $F(K1)$, $F(K1/4)$ производится расчет оптимального $K1$ с учетом приведения к базовому процессу и с учетом ограничений на зону поиска;
- при затухающих колебаниях по $F(K1/2)$, $F(K1)$, $F(1,5 K1)$ производится расчет оптимального $K1$ с учетом приведений к базовому процессу и ограничений на зону поиска;
- фиксируется ординарный процесс и проверяется условие повышения качества

регулирования:

$$F(K_{\text{опт}}) \leq F_i;$$

– при выполнении верхнего условия $K1$ принимается равным $K_{\text{опт}}$.

Далее аналогичный цикл (3) выполняется для $K2$.

Пример 1. Фрагмент автонастройки регулятора частоты MiniGrid с одним эквивалентным генератором (моделирование процессов на Simulink).

На рис. 4–7 представлены переходные характеристики для частоты в процессе оптимизации коэффициента усиления по отклонению частоты ($K1$).

По характеристикам процессов при трех значениях $K1$ в результате оптимизации целевой функции ($F(K1/2)$, $F(K1)$, $F(2 K1)$) получено оптимальное значение $K1 = 4,1$. В табл. 1 приведены характеристики процессов, представленных на рис. 4–7.

Пример 2. Фрагмент автонастройки регулятора перетока MiniGrid с одним эквивалентным генератором (моделирование процессов на Simulink).

На рис. 8–11 представлены переходные характеристики для перетока в процессе оптимизации коэффициентов усиления по отклонению перетока $K1$.

На рис. 12–14 представлены переходные характеристики для перетока в процессе оптимизации коэффициента усиления по интегралу отклонения перетока $K2$.

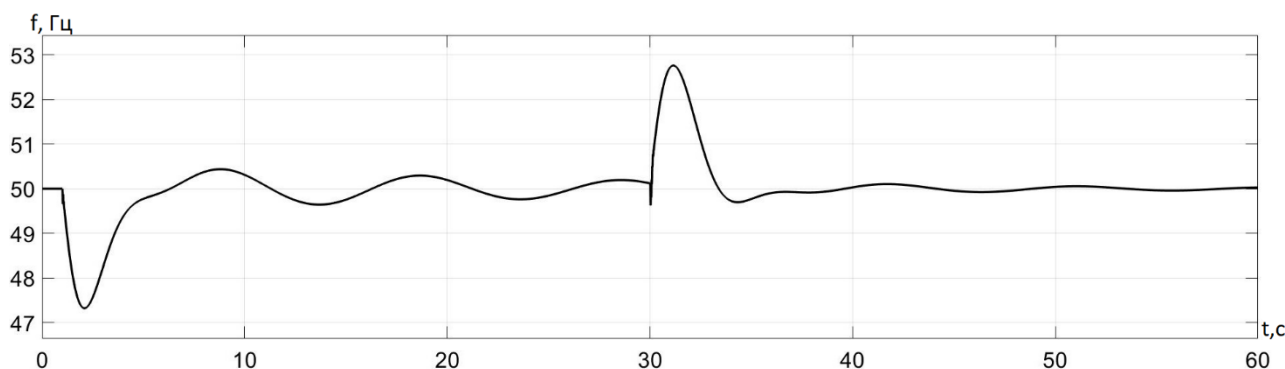


Рис. 4. Изменение частоты при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при исходных коэффициентах PI-регулятора ($K1 = 1$, $K2 = 2$)

Fig. 4. Frequency change when switching on (at an interval of 0–30 s) and off (at an interval of 30–60 s) the load of 200 kW at the initial PI coefficients of the controller ($K1 = 1$, $K2 = 2$)

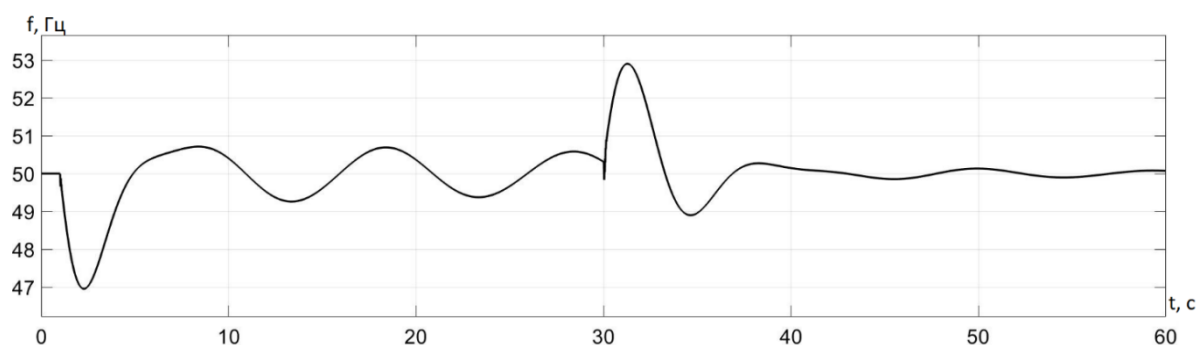


Рис. 5. Изменение частоты при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при уменьшении коэффициента K_1 PI-регулятора ($K_1 = 0,5$, $K_2 = 2$)

Fig. 5. Frequency change when switching on (at an interval of 0-30 s) and off (at an interval of 30-60 s) the load of 200 kW with a decrease in the coefficient K_1 of the PI controller ($K_1 = 0.5$, $K_2 = 2$)

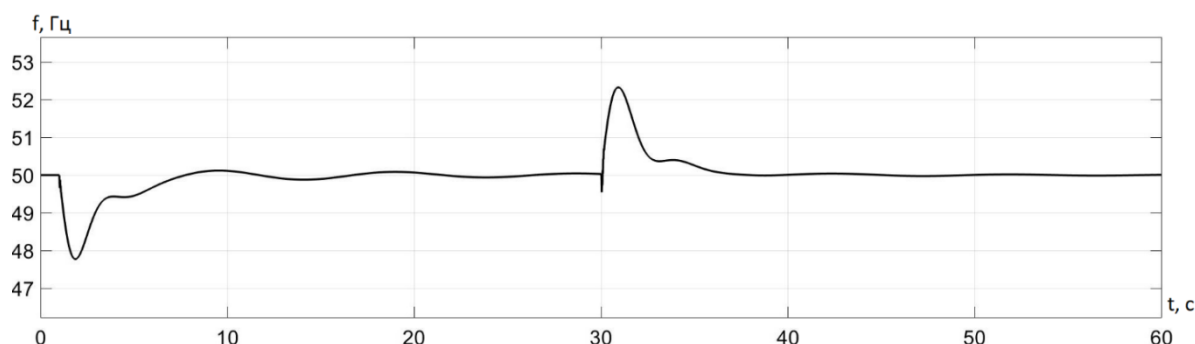


Рис. 6. Изменение частоты при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при увеличении коэффициента K_1 PI-регулятора ($K_1 = 4$, $K_2 = 2$)

Fig. 6. Frequency change when switching on (at an interval of 0-30 s) and off (at an interval of 30-60 s) the load of 200 kW with an increase in the coefficient K_1 of the PI controller ($K_1 = 4$, $K_2 = 2$)

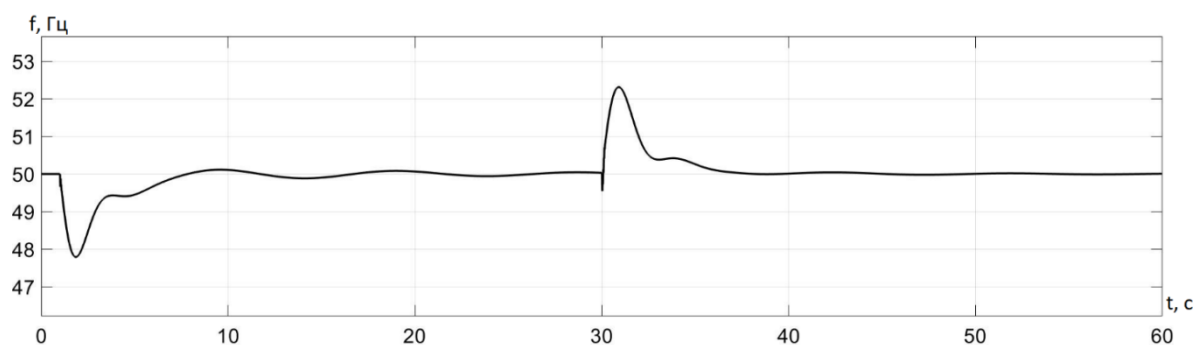


Рис. 7. Изменение частоты при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при оптимальном коэффициенте K_1 PI-регулятора на шаге покоординатного спуска ($K_1 = 4,1$, $K_2 = 2$)

Fig. 7. Frequency change when switching on (at an interval of 0-30 s) and off (at an interval of 30-60 s) the load of 200 kW at the optimal coefficient K_1 of the PI controller per step of the coordinate descent ($K_1 = 4.1$, $K_2 = 2$)

Таблица 1. Характеристики процессов при включении/отключении нагрузки

Table 1. Characteristics of the processes when switching on/off the load

№ рисунка	Включение нагрузки			Отключение нагрузки		
	клевов, Гц	перерегулирование, Гц	время регулирования, с	клевов, Гц	перерегулирование, Гц	время регулирования, с
4	2,7	0,4	> 30	2,8	0,3	> 30
5	3	0,7	> 30	2,95	1	> 30
6	2,3	0,2	27	2,3	0,05	16
7	2,3	0,2	25	2,3	0,02	15

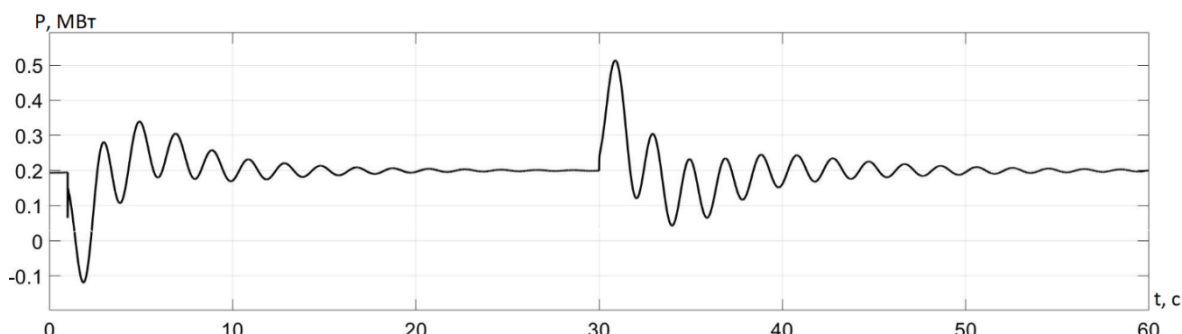


Рис. 8. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при начальных коэффициентах PI-регулятора ($K_1 = 5$, $K_2 = 2$)

Fig. 8. Change in the flow when switching on (at the interval of 0–30 s) and off (at the interval of 30–60 s) the load of 200 kW at the initial coefficients of the PI controller ($K_1 = 5$, $K_2 = 2$)

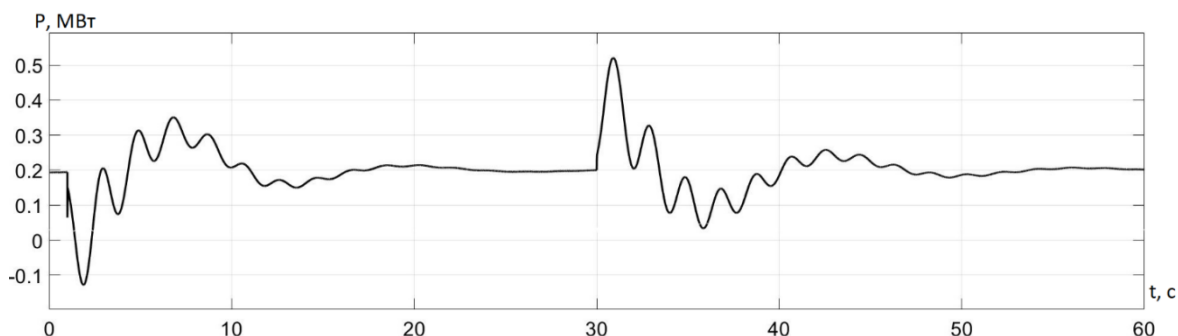


Рис. 9. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при уменьшении коэффициента K_1 PI-регулятора ($K_1 = 2.5$, $K_2 = 2$)

Fig. 9. Change in the flow when switching on (at an interval of 0–30 s) and off (at an interval of 30–60 s) the load of 200 kW with a decrease in the coefficient K_1 of the PI controller ($K_1 = 2.5$, $K_2 = 2$)

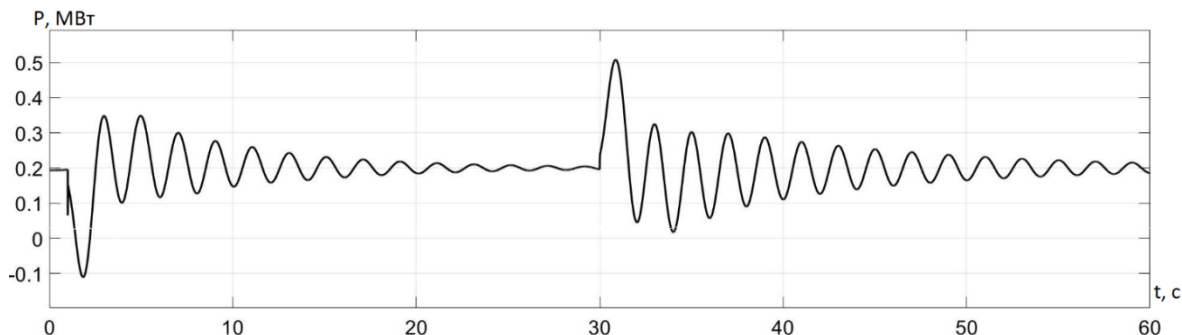


Рис. 10. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при увеличении коэффициента K_1 PI-регулятора ($K_1 = 7.5$, $K_2 = 2$)

Fig. 10. Change in the flow when switching on (at the interval of 0–30 s) and off (at the interval of 30–60 s) the load of 200 kW with an increase in the coefficient K_1 of the PI controller ($K_1 = 7.5$, $K_2 = 2$)

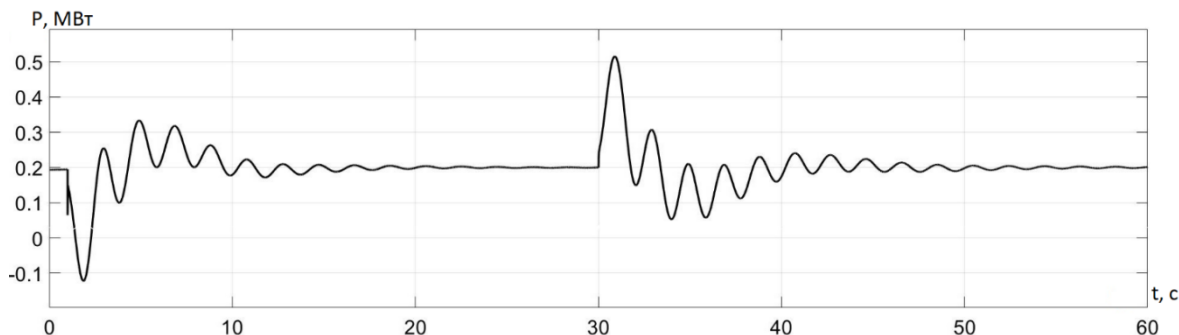


Рис. 11. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при коэффициентах PI-регулятора ($K_1 = 4.1$, $K_2 = 2$)

Fig. 11. Change in the flow when switching on (at the interval of 0–30 s) and off (at the interval of 30–60 s) the load of 200 kW at the coefficients of the PI controller ($K_1 = 4.1$, $K_2 = 2$)

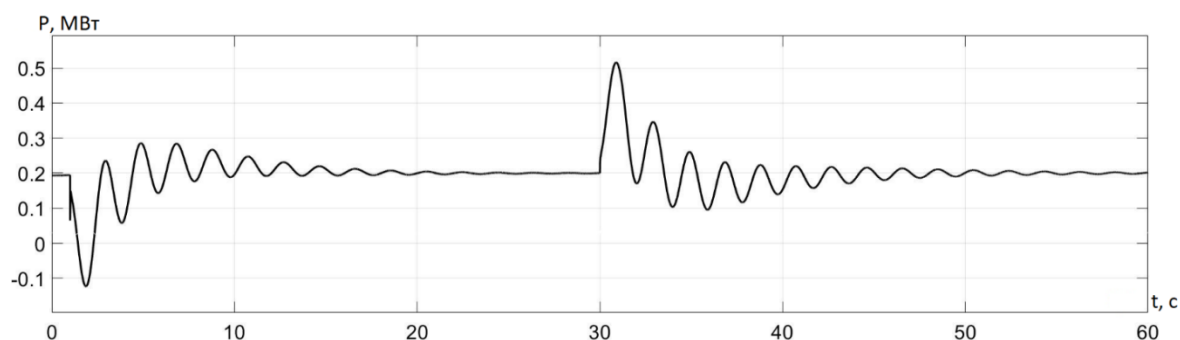


Рис. 12. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при коэффициентах PI-регулятора ($K_1 = 4,1$, $K_2 = 1$)

Fig. 12. Change in the flow when switching on (at the interval of 0-30 s) and off (at the interval of 30-60 s) the load of 200 kW at the coefficients of the PI controller ($K_1 = 4.1$, $K_2 = 1$)

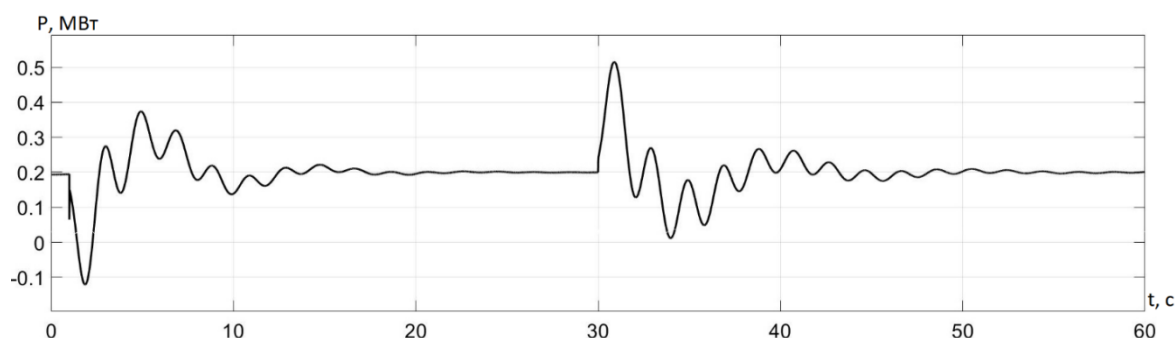


Рис. 13. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при коэффициентах PI-регулятора ($K_1 = 4,1$, $K_2 = 3$)

Fig. 13. Change in the flow when switching on (at the interval of 0-30 s) and off (at the interval of 30-60 s) the load of 200 kW at the coefficients of the PI controller ($K_1 = 4.1$, $K_2 = 3$)

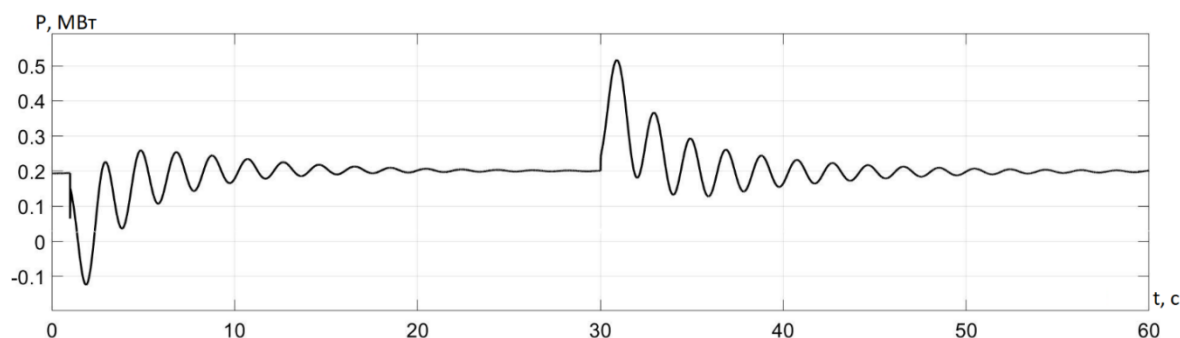


Рис. 14. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при оптимальных коэффициентах PI-регулятора ($K_1 = 4,1$, $K_2 = 0.5$)

Fig. 14. Change in the flow when switching on (at the interval of 0-30 s) and off (at the interval of 30-60 s) the load of 200 kW at optimal coefficients of the PI controller ($K_1 = 4.1$, $K_2 = 0.5$)

Таблица 2. Характеристики процессов при включении/отключении нагрузки

Table 2. Characteristics of the processes when switching on/off the load

№ рисунка	Включение нагрузки			Отключение нагрузки		
	клевов, кВт	перерегулирование, кВт	время регулирования, с	клевов, кВт	перерегулирование, кВт	время регулирования, с
8	200	65	18	160	65	25
9	200	135	25	170	100	>30
10	150	30	20	160	30	25
11	150	30	15	160	30	25
12	150	20	17	150	22	25
13	150	20	15	150	20	25
14	150	3	15	150	3	23

Графики на рисунках приведены в относительных номинальных единицах. В табл. 2 приведены характеристики процессов, представленных на рис. 9–14.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основой представленного способа самонастройки регуляторов мощности по группе переходных характеристик являются использование показателей качества переходного затухающего процесса в энергосистеме при коммутациях (набросах/сбросах) мощности, скаляризация двух показателей качества пе-

реходного процесса в целевой функции оптимизации, оптимизация коэффициентов каждого PI-регулятора мощности (по отклонению и интегралу от отклонения) методом покоординатного спуска, учет разнохарактерности процессов и разномасштабности возмущений режима при набросе/сбросе мощности MiniGrid.

Результаты проведенных исследований подтверждают работоспособность и эффективность способа для самонастройки регуляторов скорости и перетока мощности MiniGrid.

Список источников

1. Chen Liuyang, Chen Qing, Zhang Zhiming, Xie Ranran. Cable fault characteristics of energy storage in DC microgrids // 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACPEE48638.2020.9136207>.
2. Zhou Xuesong, Guo Tie, Ma Youjie. An overview on microgrid technology // International Conference on Mechatronics and Automation (Beijing, 2–5 August 2015). Beijing: IEEE, 2015. P. 76–81. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2015.7237460>.
3. Баринов В. А. Перспективы развития электроэнергетики России на период до 2030 г. // Анализ и прогноз. Журнал ИМЭМО РАН. 2010. № 3. С. 13–20.
4. Коломыцев В. Г., Рустамханова Г. И. Модификация временного метода Зиглера–Никольса и оптимизация параметров ПИД-регуляторов средствами Matlab // Фундаментальные исследования. 2016. № 11-3. С. 526–531.
5. Фишов А. Г., Ивкин Е. С., Гилев О. В., Какоша Ю. В. Режимы и автоматика Минигрид, работающих в составе распределительных электрических сетей ЕЭС // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 3. С. 22–37.
6. Пат. № 2065067, Российская Федерация, F02D 31/00. Устройство для настройки регулятора частоты вращения дизель генератора / Б. А. Усик, В. Ф. Терехов; заявитель и патентообладатель Серпуховское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск. Заявл. 30.07.1991; опублик. 10.08.1996.
7. Пат. № 2714567, Российская Федерация, G05B 13/00. Способ автоматической настройки регулятора / С. В. Тарарыкин, А. А. Анисимов, А. И. Терехов, К. Е. Соколов; заявитель и патентообладатель Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина. Заявл. 06.05.2019; опублик. 18.02.2020.
8. Datta A., Konar S., Singa L. J., Singh K. M., Lalfakzuala A. A study on load frequency control for a hybrid power plant // Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2017.8117975>.
9. Shaker H. K., Zoghby H. E., Bahgat M. E., Abdel-
10. Ghany A. M. Advanced control techniques for an interconnected multi area power system for load frequency control // 21st International Middle East Power Systems Conference (Cairo, 17–19 December 2019). Cairo: IEEE, 2019. P. 710–715. <https://doi.org/10.1109/MEPCON47431.2019.9008158>.
11. Karimi H., Beheshti M. T. H., Ramezani A. Decentralized voltage and frequency control in an autonomous ac microgrid using gain scheduling tuning approach // 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (Shiraz, 10–12 May 2016). Shiraz: IEEE, 2016. P. 1597–1602. <https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2016.7585776>.
12. Satapathy P., Debnath M. K., Singh M. B., Mohanty P. K. Design of FPI controller for load frequency control of a nonlinear power system // Technologies for Smart-City Energy Security and Power. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICSESP.2018.8376681>.
13. Abubakr H., Mohamed T. H., Hussein M. M., Shabib G. ESO-based selftuning frequency control design for isolated microgrid system // 21st International Middle East Power Systems Conference (Cairo, 17–19 December 2019). Cairo: IEEE, 2019. P. 589–593. <https://doi.org/10.1109/MEPCON47431.2019.9008042>.
14. Tripathy S., Debnath M. K., Kar S. K. Jaya algorithm tuned FO-PID controller with first order filter for optimum frequency control // 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology. 2021. <https://doi.org/10.1109/ODICON50556.2021.9428959>.
15. Patel N. C., Debnath M. K., Bagarty D. P., Das P. Load frequency control of a non-linear power system with optimal PID controller with derivative filter // IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (Chennai, 21–22 September 2017). Chennai: IEEE, 2017. P. 1515–1520. <https://doi.org/10.1109/ICPSCI.2017.8391964>.
16. Mishra S., Nayak P. C., Prusty U. C., Prusty R. C. Model predictive controller based load frequency control of isolated microgrid system integrated to plugged-in electric vehicle // 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication

and Computing Technology. 2021. <https://doi.org/10.1109/ODICON50556.2021.9428956>.

16. Zaidi A., Cheng Qi. Online and offline load frequency controller design // IEEE Texas Power and Energy Conference. 2017. <https://doi.org/10.1109/TPEC.2017.7868283>.

17. Mohamed T. H., Hussein M. M. Online gain tuning of conventional load frequency controller for Microgrid power system // Twentieth International Middle East Power Systems Conference (Cairo, 18–20 December 2018). Cairo: IEEE, 2018. P. 424–428. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2018.8635107>.

18. Ali M., Djalal M. R., Fakhrurozi M., Kadaryono, Budi-man. Optimal design capacitive energy storage (CES) for load frequency control in micro hydro power plant using flower pollination algorithm // Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (Batu, 9–11 October 2018). Batu: IEEE, 2018. P. 21–26.

<https://doi.org/10.1109/EECCIS.2018.8692997>.

19. Седойкин Д. Н., Юрганов А. А. Адаптивный автоматический регулятор возбуждения на основе нечеткого аппроксиматора в режиме недовозбуждения синхронной машины // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 22–29. <https://doi.org/10.18721/JEST.240202>.

20. Булатов Ю. Н., Игнатьев И. В., Попик В. А. Методика выбора оптимальных настроек систем АРЧВ генераторов электростанций // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1. С. 192–198.

21. Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Чан Зюй Хынг. Интеллектуальные регуляторы для установок распределенной генерации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2. С. 83–95.

References

1. Chen Liuyang, Chen Qing, Zhang Zhiming, Xie Ranran. Cable fault characteristics of energy storage in DC microgrids. In: *5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACPEE48638.2020.9136207>.

2. Zhou Xuesong, Guo Tie, Ma Youjie. An overview on microgrid technology. In: *International Conference on Mechatronics and Automation*. 2–5 August 2015, Beijing. Beijing: IEEE; 2015, p. 76–81. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2015.7237460>.

3. Barinov V. A. Development prospects of the electric power industry in Russia for the period up to 2030. *Nacional'nyj issledovatel'skij institut mirovoj ekonomiki i mezhdunarodnyh otnoshenij im. E. M. Primakova Rossijskoj akademii nauk = Analysis and Forecasting. IMEMO Journal*. 2010;3:13–20. (In Russ.).

4. Kolomishev V. G. Rustamhanova G. I. Modification of the Ziegler-Nichols time method and optimization of PID-regulator parameters by means of Matlab. *Fundamentalnie issledovaniya = Fundamental research*. 2016;11-3:526–531. (In Russ.).

5. Fishov A. G., Ivkin E. S., Gilev O. V., Kakosha Yu. V. Modes and automation of minigrid operating as part of the UPS distribution electric networks. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2021;3:22–37. (In Russ.).

6. Usik V. A., Terekhov V. F. *Device for tuning diesel-generator speed controller*. Patent RF, no 2065067; 1991. (In Russ.).

7. Tararykin S. V., Anisimov A. A., Terekhov A. I., Sokolov K. E. *Method of automatic tuning of controller*. Patent RF, no 2714567; 2019. (In Russ.).

8. Datta A., Konar S., Singa L. J., Singh K. M., Lalfakzuala A. A study on load frequency control for a hybrid power plant. In: *Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies*. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2017.8117975>.

9. Shaker H. K., Zoghby H. E., Bahgat M. E., Abdel-Ghany A. M. Advanced control techniques for an interconnected multi area power system for load frequency

control. In: *21st International Middle East Power Systems Conference*. 17–19 December 2019, Cairo. Cairo: IEEE; 2019, p. 710–715. <https://doi.org/10.1109/MEPCON47431.2019.9008158>.

10. Karimi H., Beheshti M. T. H., Ramezani A. Decentralized voltage and frequency control in an autonomous ac microgrid using gain scheduling tuning approach. In: *24th Iranian Conference on Electrical Engineering*. 10–12 May 2016, Shiraz. Shiraz: IEEE; 2016, p. 1597–1602. <https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2016.7585776>.

11. Satapathy P., Debnath M. K., Singh M. B., Mohanty P. K. Design of FPI controller for load frequency control of a nonlinear power system. In: *Technologies for Smart-City Energy Security and Power*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICSESP.2018.8376681>.

12. Abubakr H., Mohamed T. H., Hussein M. M., Shabib G. ESO-based self tuning frequency control design for isolated microgrid system. In: *21st International Middle East Power Systems Conference*. 17–19 December 2019, Cairo. Cairo: IEEE; 2019, p. 589–593. <https://doi.org/10.1109/MEPCON47431.2019.9008042>.

13. Tripathy S., Debnath M. K., Kar S. K. Jaya algorithm tuned FO-PID controller with first order filter for optimum frequency control. In: *1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ODICON50556.2021.9428959>.

14. Patel N. C., Debnath M. K., Bagarty D. P., Das P. Load frequency control of a non-linear power system with optimal PID controller with derivative filter. In: *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering*. 21–22 September 2017, Chennai. Chennai: IEEE; 2017, p. 1515–1520. <https://doi.org/10.1109/ICPSI.2017.8391964>.

15. Mishra S., Nayak P. C., Prusty U. C., Prusty R. C. Model predictive controller based load frequency control of isolated microgrid system integrated to plugged-in electric vehicle. In: *1st Odisha International*

Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology. 2021. <https://doi.org/10.1109/ODICON50556.2021.9428956>.

16. Zaidi A., Cheng Qi. Online and offline load frequency controller design. In: *IEEE Texas Power and Energy Conference*. 2017. <https://doi.org/10.1109/TPEC.2017.7868283>.

17. Mohamed T. H., Hussein M. M. Online gain tuning of conventional load frequency controller for Microgrid power system. In: *Twentieth International Middle East Power Systems Conference*. 18–20 December 2018, Cairo. Cairo: IEEE; 2018, p. 424-428. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2018.8635107>.

18. Ali M., Djalal M. R., Fakhrurozi M., Kadaryono, Budiman. Optimal design capacitive energy storage (CES) for load frequency control in micro hydro power plant using flower pollination algorithm. In: *Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar*. 9–11 October 2018, Batu. Batu: IEEE; 2018, p. 21-26.

<https://doi.org/10.1109/EECCIS.2018.8692997>.

19. Sedoykin D. N., Yurganov A. A. An adaptive automatic excitation regulator based on fuzzy approximation operating with an under-excited generator. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta. Estestvennye i inzhenernye nauki = St. Petersburg Polytechnic University. Series: Journal of engineering sciences and technology*. 2018;24(2):22-29. <https://doi.org/10.18721/JEST.240202>.

20. Bulatov U. N., Ignatyev I. V., Popik V. A. Technique of sampling optimal settings of power stations generators ARRF systems. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2011;1:192-198. (In Russ.).

21. Bulatov U. N., Krukov A. V., Hyng Chan Zyuj. Intelligent controllers for distributed generation plants. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2015;2:83-95. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фишов Александр Георгиевич,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматизированных
электроэнергетических систем,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия

Осинцев Анатолий Анатольевич,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электрических станций,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия

Фролов Михаил Юрьевич,

кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизированных
электроэнергетических систем,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия

Армеев Денис Владимирович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизированных
электроэнергетических систем,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия

Мурашкина Инна Сергеевна,

аспирант,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander G. Fishov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Automated Electric Power
Systems,
Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia

Anatoly A. Osintsev,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electric Power
Plants,
Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia

Mikhail Yu. Frolov,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Automated
Electric Power Systems,
Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia

Denis V. Armeev,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Automated
Electric Power Systems,
Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia

Inna S. Murashkina,

Postgraduate Student,
Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.01.2021; одобрена после рецензирования 18.02.2021; принята к публикации 26.02.2022.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 18.01.2021; approved after reviewing 18.02.2021; accepted for publication 26.02.2022.