

УДК 621.31

Разработка структурной схемы адаптивного пускового органа автоматике предотвращения нарушения устойчивости

И.Ю. Ефремова, И.З. Глушкин
ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»», АО «РАСУ»,
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: i.u.efremova@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время при настройке пусковых органов автоматике предотвращения нарушения устойчивости, выявляющих перегрузку сечения, опасную для статической устойчивости параллельной работы, не учитываются схемно-режимные условия. При таком подходе пусковой орган имеет одну уставку, рассчитанную для худшего режима. Это вызывает излишние срабатывания пускового органа, что приводит к снижению пропускной способности сечения. Для решения данной проблемы целесообразно использовать адаптивный пусковой орган, при настройке которого были бы учтены схемно-режимные условия электрической сети. При этом особое внимание уделяется усовершенствованию устройств автоматической дозировки управляющих воздействий, в то время как модернизации пусковых органов должного внимания не уделяется. В настоящее время одной из важных задач, возлагаемых на пусковые органы, является фиксация перегрузки сечения. В связи с этим актуальной является разработка алгоритмов настройки и структурной схемы адаптивного пускового органа автоматике предотвращения нарушения устойчивости. Уставка такого пускового органа должна рассчитываться исходя из существующих в реальном времени схемно-режимных условий, что позволит сократить количество излишних срабатываний и будет способствовать повышению пропускной способности сечения энергосистемы.

Материалы и методы: Используется метод анализа статической устойчивости по знаку свободного члена характеристического уравнения энергосистемы. Данный метод применяется для адаптивной настройки пускового органа автоматике предотвращения нарушения устойчивости. Дополнительно реализуется выявление пусковым органом места и величины небаланса активной мощности в энергосистеме на основе анализа изменения углов между векторами напряжений по концам сечений и скольжения.

Результаты: Разработана структурная схема адаптивного пускового органа автоматике предотвращения нарушения устойчивости, выявляющего перегрузку сечения по углу между векторами напряжений по концам сечения, отличающаяся тем, что позволяет пусковому органу настраиваться с учетом существующих в реальном времени схемно-режимных условий и выявлять место и величину небаланса активной мощности в энергосистеме. Предложенная структурная схема смоделирована в ПК Matlab для оценки эффективности ее функционирования.

Выводы: Результаты моделирования подтвердили, что уставка пускового органа автоматически изменяется с изменением схемно-режимных условий, что сократит излишние срабатывания пускового органа и будет способствовать повышению пропускной способности сечения. Также в ходе моделирования было установлено, что пусковой орган корректно выявляет место и величину небаланса активной мощности в энергосистеме, что в дальнейшем позволит наиболее точно выбирать дозировку управляющего воздействия и место его реализации.

Ключевые слова: автоматика предотвращения нарушения устойчивости, адаптивный пусковой орган, управляющее воздействие, статическая устойчивость, характеристическое уравнение.

Development of an adaptive fault detector structural scheme of automatic stability control system

I.U. Efremova, I.Z. Glouskin
National Research University «Moscow Power Engineering Institute», JSC «RACS»,
Moscow, Russian Federation
E-mail: i.u.efremova@yandex.ru

Abstract

Background: Methods of adjustment of fault detectors of automatic stability control devices detecting cross section overload threatening steady-state stability of parallel operation do not account for operating modes and conditions. In this case, the fault detector has one setting calculated for the worst mode. This causes unwanted tripping of the fault detector and decreases the cross-section transmission capacity. An appropriate solution to this problem is to use an adaptive fault detector that can be adjusted to the power line mode and operation conditions. Special attention in this case is paid to improving automatic control action adjustment, whereas fault detector modernization is largely disregarded. One of the main functions of fault detectors is cross-section overload detection. Under these conditions, an important task is to develop adjustment algorithms and a structural scheme of adaptive fault detectors to ensure stability. The setting of such fault detector should be calculated based on the real time mode and operation conditions, which will reduce the number of unwanted trippings and increase the power system cross-section capacity.

Materials and methods: We applied the method of steady-state stability analysis by the sign of the power system characteristic equation constant term. This method is used for adaptive adjustment of fault detectors for automatic stability control

system. The fault detector also identifies the location and value of active power imbalance based on analyzing the slip and angles between voltage phasors at the cross-section ends.

Results: A structural scheme of the adaptive fault detector has been developed. The fault detector ensures the system stability by detecting the cross section overload through the measurement of the angle between the voltage phasors at the cross-section ends. The distinguishing feature of this fault detector is its ability to adjust to the real time mode and operation conditions and to identify the location and value of the imbalance of active power in an energy system. The proposed scheme has been simulated in the Matlab software package to assess its efficiency.

Conclusions: Experiments have confirmed that the fault detector setting automatically adjusts to the mode and operation conditions, which reduces the number of unwanted trippings of the fault detector and will improve the cross-section transmission capacity. As the simulation results show, the fault detector identifies the location and value of the active power imbalance in a power system quite correctly, which will enable us in future to more accurately select the control action.

Key words: automatic stability control devices, adaptive fault detector, control action, steady-state stability, characteristic equation.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.6.015-024

Состояние вопроса. Перегрузка сечений, развивающаяся постепенно в нормальном режиме электроэнергетической системы (ЭЭС) или возникающая внезапно, как аварийное возмущение может привести к нарушению статической устойчивости. За решение проблем устойчивости энергосистемы отвечает система противоаварийной автоматики (ПА) – АПНУ. АПНУ осуществляет выявление аварийного возмущения (пусковые органы), определение дозировки управляющих воздействий, реализацию управляющих воздействий.

В настоящее время особое внимание уделяется усовершенствованию устройств автоматической дозировки управляющих воздействий. Главным примером является создание и модернизация централизованной системы противоаварийной автоматики (ЦСПА). Основная задача данной системы – адаптивный выбор дозировки управляющих воздействий ПА [1, 2]. Но на пусковые органы также возлагаются важные задачи, одна из которых – выявление перегрузки сечения энергосистемы, опасной для сохранения статической устойчивости.

В настоящее время настройка пусковых органов АПНУ, выявляющих перегрузку сечения, базируется на двухмашинном представлении сложной многомашинной энергосистемы. Сложная сеть представляется совокупностью двухмашинных эквивалентов. Для каждого сечения приходится выбирать худший случай по режиму всей недоступной для контроля части энергосистемы. Пусковой орган при такой настройке имеет одну уставку для различных режимов работы энергосистемы. Данное упрощение ведет к излишним срабатываниям пускового органа, что не позволяет полностью использовать пропускную способность сечения энергосистемы. Вопрос о выявлении аварийной перегрузки – один из наименее проработанных в ПА. Следствием недостаточного развития принципов выявления перегрузки являются неэффективные решения, что приводит к неправильным срабатываниям органов, выявляющих перегрузку [3, 4, 5].

В то же время схемно-режимные условия не могут не влиять на пропускную способность сечения энергосистемы. Это влияние необходи-

мо учитывать при настройке пускового органа АПНУ.

В [6] предложен алгоритм адаптивной настройки пускового органа ПА по мощности, который позволяет при расчете уставки пускового органа учитывать схемно-режимные условия. Анализ эффективности данного алгоритма показал, что его применение позволит повысить пропускную способность сечения.

В [7] предложен алгоритм адаптивной настройки пускового органа ПА по углу, отличающийся тем, что он позволяет рассчитывать уставку пускового органа для существующих в реальном времени схемно-режимных условий на основе анализа статической устойчивости по прямому признаку – по знаку свободного члена характеристического уравнения энергосистемы, а также тем, что позволяет выявлять место и величину небаланса активной мощности в энергосистеме.

Ниже представлены разработанная структурная схема адаптивного пускового органа АПНУ, реализующая предложенные ранее алгоритмы, и структурная схема АПНУ с адаптивным пусковым органом.

Структурная схема смоделирована в ПК Matlab, исследована эффективность ее работы.

Материалы и методы. Предлагается структурная схема адаптивного пускового органа АПНУ, выявляющего перегрузку сечения по углу между векторами напряжений по концам сечения.

При построении данной структурной схемы использован алгоритм адаптивной настройки пускового органа, приведенный в [7]. Способ анализа статической устойчивости, приведенный в [7], известен и описан в [8, 9], но не применялся ранее в ПА, так как возможности существующей аппаратной части не позволяли его реализовать. В настоящее время появление новых технологий позволяет реализовать данный способ, впервые предлагается применить его для адаптивной настройки пускового органа АПНУ. Настройка осуществляется следующим образом.

1. Рассчитываются значения свободного члена характеристического уравнения ЭЭС:

$$a = \begin{bmatrix} \frac{dP_1 d\delta_{12}}{T_{j1}} - \frac{dP_2 d\delta_{12}}{T_{j2}} & \dots & \frac{dP_1 d\delta_{1n}}{T_{j1}} - \frac{dP_2 d\delta_{1n}}{T_{j2}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{dP_1 d\delta_{12}}{T_{j1}} - \frac{dP_n d\delta_{12}}{T_{jn}} & \dots & \frac{dP_1 d\delta_{1n}}{T_{j1}} - \frac{dP_n d\delta_{1n}}{T_{jn}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

где a – значение свободного члена характеристического уравнения; δ_{in} – углы между векторами напряжений узлов схемы; T_{ji} – момент инерции эквивалентных генераторов; P_i – активные мощности эквивалентных генераторов; n – количество узлов схемы.

2. Определяется оптимальная траектория утяжеления режима по следующему алгоритму:

а) в одном из узлов увеличивается величина активной мощности;

б) рассчитывается новое значение свободного члена характеристического уравнения;

в) определяется величина $\Delta P/\Delta a$, где ΔP – величина изменения активной мощности в узле; Δa – величина изменения значения свободного члена характеристического уравнения;

г) алгоритм по пунктам а–в повторяется для других узлов;

д) выбирается узел, для которого величина $\Delta P/\Delta a$ минимальна. Следовательно, изменение активной мощности в данном узле наиболее сильно влияет на устойчивость, т.е. траектория утяжеления при изменении активной мощности в данном узле оптимальна и утяжелять режим целесообразно именно по данной траектории.

3. Осуществляется утяжеление режима по выявленной оптимальной траектории и получение предельного по условию статической аperiodической устойчивости режима ЭЭС. Предельным является режим, в котором значение свободного члена характеристического уравнения системы равно нулю.

4. Рассчитывается угол между векторами напряжений по концам сечения в полученном предельном режиме (сечение, где устанавливается пусковой орган). Расчет осуществляется по выражениям:

$$\begin{cases} P_1 = E_1^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + \sum_{k=2}^m E_1 E_k y_{1k} \sin(\delta_{1k} - \alpha_{1k}); \\ P_2 = E_2^2 y_{22} \sin \alpha_{22} + \sum_{k=1, k \neq 2}^m E_2 E_k y_{2k} \sin(\delta_{2k} - \alpha_{2k}); \\ \dots \\ P_m = E_m^2 y_{mm} \sin \alpha_{mm} + \sum_{k=1}^{m-1} E_m E_k y_{mk} \sin(\delta_{mk} - \alpha_{mk}), \end{cases} \quad (2)$$

где P_k – активная мощность, протекающая через узел k ; E_k – ЭДС узла k ; y_{kk} , y_{km} – собственные и взаимные проводимости узлов; δ_{km} – углы между ЭДС узлов.

5. Осуществляется выбор уставки пускового органа. Уставкой пускового органа, установленной на контролируемом сечении, является значение угла между векторами напряжений по концам сечений в предельном режиме по

условию статической аperiodической устойчивости с учетом запаса, которое определяется следующим образом:

$$\delta_{ijуст} = K \cdot \delta_{ijпр}, \quad (3)$$

где $\delta_{ijпр}$ – угол между векторами напряжений по концам сечения, соответствующий нарушению статической устойчивости; K – коэффициент запаса.

В [7] исследована работа данного алгоритма и подтверждена его эффективность.

При построении структурной схемы пускового органа также реализована функция выявления места и величины небаланса активной мощности в энергосистеме.

Метод выявления места небаланса активной мощности в энергосистеме основан на анализе изменения углов между векторами напряжений по концам сечений по следующему правилу: если все углы, связанные с данным, изменяются в одном направлении, значит, небаланс произошел в данном узле.

Метод выявления величины небаланса заключается в расчете небаланса активной мощности по выражению

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \Delta P, \quad (4)$$

где $\frac{d^2 \delta}{dt^2}$ – изменение скольжения; T_j – момент

инерции эквивалентного генератора; ΔP – величина небаланса активной мощности.

Результаты. На рис. 1 приведена разработанная структурная схема адаптивного пускового органа АПНУ.

Устройство осуществляет адаптивное выявление факта перегрузки контролируемого сечения энергосистемы, опасной для статической устойчивости энергосистемы, по параметрам режима, получаемым от системы мониторинга переходных режимов (СМПР). Дополнительно устройство осуществляет выявление величины и места небаланса активной мощности в энергосистеме, анализируя изменение угла между векторами напряжений по концам сечений и скольжения.

Для функционирования пускового органа согласно структурной схеме необходима следующая входная информация: активные мощности узлов, под которыми понимаются разности между мощностями генерации и нагрузок узлов (P_i); модули напряжений узлов (U_i); фазы напряжений узлов (δ_i), в которых установлена система СМПР; сопротивления связей между узлами схемы (X_i); моменты инерции эквивалентных генераторов узлов (T_j); сигналы «фиксация отключения линии» («ФОЛ») всех линий схемы.

В результате функционирования блоков схемы формируются следующие выходные сигналы: сигнал «перегрузка сечения»; сигнал «небаланс в узле i »; сигнал «величина небаланса мощности ΔP МВт».

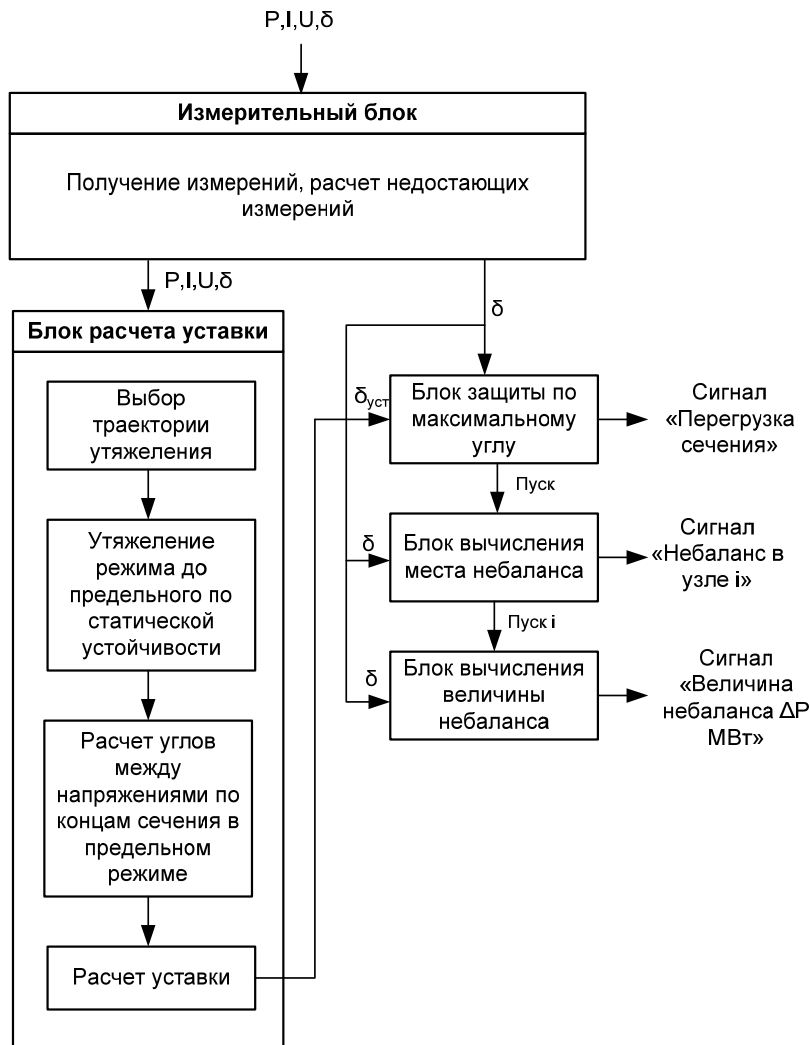


Рис. 1. Структурная схема адаптивного пускового органа АПНУ

Структурная схема состоит из следующих блоков: измерительный блок; блок расчета уставки; блок защиты по максимальному углу; блок вычисления места небаланса; блок вычисления величины небаланса.

Измерительный блок осуществляет получение измерений от системы СМГР, вычисление недостающих измерений и углов между векторами напряжений по концам сечений и передачу всех измерений другим блокам.

Входными величинами измерительного блока являются: P_i , U_i , δ_i (для тех узлов, в которых установлено оборудование системы СМГР); X_i ; сигналы «ФОЛ» всех линий схемы.

Выходными величинами измерительного блока являются: P_i , U_i , δ_i (для всех узлов схемы); углы между векторами напряжений по концам сечений (δ_{ij}).

Вычисление недостающих измерений блок осуществляет по следующим выражениям:

$$U = I \cdot Z; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^k E_i = \sum_{i=1}^m I_i Z_i, \quad (6)$$

где U – напряжение (разность потенциалов между началом и концом электрической цепи); I – ток в цепи; Z – сопротивление цепи; k – число источников; m – число ветвей; E_i – ЭДС i -го источника; I_i , Z_i – ток и сопротивление i -й ветви.

Вычисление углов между векторами напряжений по концам сечений производится по выражению

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j, \quad (7)$$

где δ_{ij} – углы между векторами напряжений по концам сечений; δ_i , δ_j – фазы напряжений в узлах схемы.

В случае отключения линии сигнал «ФОЛ» поступает в алгоритм и по факту прихода сигнала осуществляется обнуление соответствующей проводимости.

Работа измерительного блока исследована в [7]. Установлено, что по выражениям (5) и (6) можно вычислить недостающие измерения, но с определенной погрешностью, поэтому чем больше измерений будет доступно, тем выше будет точность других алгоритмов.

Блок расчета уставки осуществляет расчет статической устойчивости по знаку свободного

члена характеристического уравнения, поиск оптимальной траектории утяжеления, утяжеление режима до предельного по статической устойчивости по выявленной траектории, расчет значений углов между векторами напряжений по концам сечений (для контролируемого сечения) в полученном предельном режиме (предельные углы), расчет уставки пускового органа. Данная уставка передается блоку защиты по максимальному углу.

Входными величинами блока расчета уставки являются: P_i , U_i , δ_i (для всех узлов схемы от измерительного блока); X_i .

Выходной величиной блока расчета уставки является уставка пускового органа $P_{уст}$.

Блок защиты по максимальному углу осуществляет измерение угла между векторами напряжений по концам сечения для контролируемого сечения и сравнение его с уставкой. В случае превышения углом уставки блок выдает сигнал «перегрузка сечения», который передается в автоматику дозирования воздействий (АДВ), и сигнал «пуск», который передается блоку выявления места небаланса.

Входными величинами блока защиты по максимальному углу являются: значение угла между векторами напряжений по концам сечения для контролируемого сечения δ_{ij} от измерительного блока; значение уставки $\delta_{уст}$ от блока расчета уставки.

Выходными величинами блока защиты по максимальному углу являются: сигнал «перегрузка сечения»; сигнал «пуск».

Блок выявления места небаланса осуществляет выявление места небаланса по изменению углов между векторами напряжений по концам сечений. Вычисляется скольжение, при превышении скольжением уставки вычисляются углы между векторами напряжений по концам сечений и сравниваются с предыдущими значениями. Далее осуществляется вычисление изменений углов, определение знака изменений углов. Выявление места небаланса производится по принципу: если все углы, связанные с i , изменились в одном направлении, значит, небаланс в узле i . После выявления небаланса в узле i и получения сигнала «пуск» от блока защиты по максимальному углу осуществляется передача сигнала «небаланс в узле i » в АДВ и сигнал «пуск i » блоку вычисления величины небаланса.

Входными величинами блока выявления места небаланса являются: значение фаз напряжений всех узлов схемы δ_i от измерительного блока; сигнал «пуск» от блока защиты по максимальному углу.

Выходными величинами блока выявления места небаланса являются: сигнал «небаланс в узле i »; сигнал «пуск i ».

Блок вычисления величины небаланса осуществляет измерение углов между векторами напряжений по концам сечений, вычисление скольжений, вычисление изменений скольжений,

по сигналу «пуск i » от блока выявления места небаланса, вычисление величины небаланса по выражению (4) для узла i . Значение величины небаланса передается в АДВ.

Входными величинами блока вычисления величины небаланса являются: значение фаз напряжений узлов схемы δ_i от измерительного блока; сигнал «пуск i » от блока выявления места небаланса; T_j .

Выходной величиной блока вычисления величины небаланса является сигнал «величина небаланса мощности ΔP МВт».

Расчет периодически повторяется. Таким образом, осуществляется адаптивный расчет уставки пускового органа, что сокращает его излишние срабатывания и способствует повышению пропускной способности сечения.

Структурная схема АПНУ с адаптивным пусковым органом приведена на рис. 2.

Схема функционирует следующим образом: регистраторы переходных режимов, устанавливаемые на объектах ЭЭС, обеспечивают синхронизированные по времени измерения требуемых параметров энергоузла. Измерения на объектах концентрируются в коммутационных серверах, обеспечивающих архивирование и передачу информации к адаптивному пусковому органу АПНУ по каналам связи. На тех же объектах устанавливаются устройства ФОЛ, фиксирующие отключения линий связи между узлами схемы, сигналы об отключении линий передаются к адаптивному пусковому органу АПНУ по каналам связи. Пусковой орган АПНУ осуществляет адаптивное выявление факта перегрузки контролируемого сечения энергосистемы, опасной для статической устойчивости, по параметрам режима, получаемым от системы СМГР с учетом состояния схемы (информация от ФОЛ). Дополнительно устройство осуществляет выявление величины и места небаланса активной мощности в энергосистеме, анализируя изменение угла между векторами напряжений по концам сечений и скольжения. Адаптивный пусковой орган АПНУ выдает сигнал «перегрузка сечения», сигнал «небаланс в узле i », сигнал «величина небаланса мощности ΔP МВт» устройству автоматической дозирования воздействий. Данное устройство осуществляет на основе полученной информации выбор управляющего воздействия.

В предложенной структурной схеме осуществляется адаптивное выявление перегрузки, что дает возможность предотвратить излишний пуск АДВ и излишний ввод управляющего воздействия. Выявление места и величины небаланса позволят устройству АДВ наиболее точно выбрать дозировку управляющего воздействия и реализовывать его в месте возникновения небаланса, что наиболее эффективно.

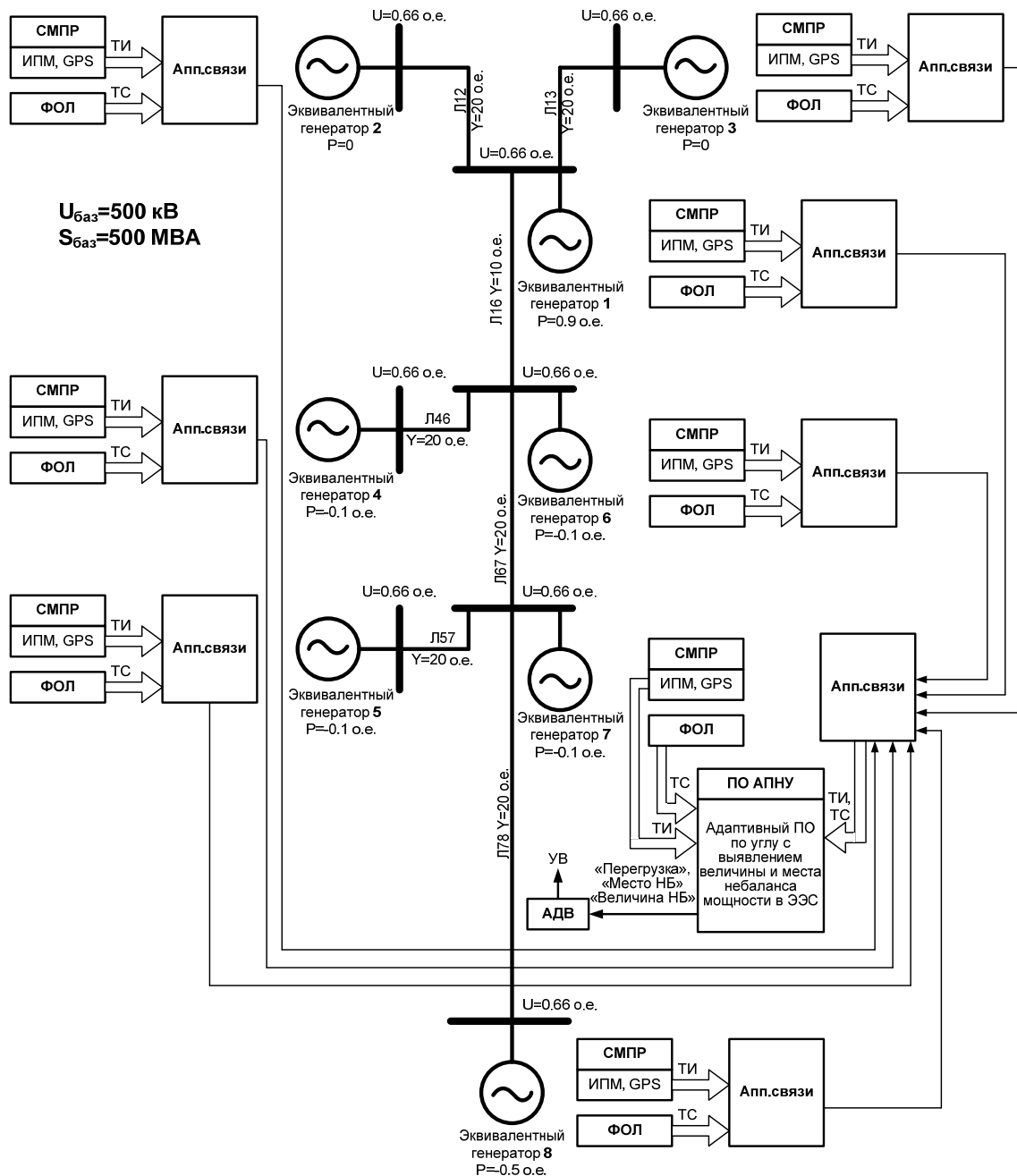


Рис. 2. Структурная схема АГНУ с адаптивным пусковым органом

Для реализации предложенной структурной схемы необходима установка следующего оборудования:

а) на объектах ЭЭС (в контролируемых узлах):

- оборудование системы СМПР (измерительные преобразователи, коммутационные серверы, приемник системы GPS/ГЛОНАСС);
- оборудование связи;
- оборудование ПА (ФОЛ);

б) в месте установки адаптивного пускового органа:

- оборудование системы СМПР (измерительные преобразователи, коммутационные серверы, приемник системы GPS/ГЛОНАСС);
- оборудование связи;
- оборудование ПА (ФОЛ);

– микропроцессорное устройство – адаптивный пусковой орган (в соответствии с предложенной схемой).

Необходимо отметить, что в настоящее время указанное оборудование (за исключением адаптивного пускового органа) устанавливается на всех проектируемых и модернизируемых объектах генерации и сетевых объектах выше 220 кВ. Это означает, что для реализации предложенной структурной схемы возможно использование существующего оборудования, что минимизирует затраты на реализацию.

Предложенная структурная схема была смоделирована в ПК Matlab для тестовой энергосистемы из 8 узлов (рис. 2).

Каждый узел представлен генератором и нагрузкой. Электрическая модель генератора представляет собой синхронную машину с

демпферными обмотками (2 обмотки в оси q и 1 обмотка в оси d) и описывается системой уравнений Парка-Горева [10]. Нагрузка представлена трехфазной параллельной RLC -нагрузкой [11].

Моделирование производилось для двух характерных режимов работы тестовой схемы. Данные режимы отличаются различными значениями активных мощностей, потребляемых в узлах 4 и 5.

Активные мощности узлов для режима 1 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Описание режима 1 тестовой схемы

№ узла	P , МВт	P , о.е.
1	650	1,3
2	0	0
3	0	0
4	-150	-0,3
5	-150	-0,3
6	-50	-0,1
7	-50	-0,1
8	-250	-0,5

В данном режиме уставка пускового органа составляет 0,412 рад. В момент времени 10,5 с происходит наброс нагрузки в узле 8. Срабатывание пускового органа происходит при активной мощности по Л78 (рис. 2) 470 МВт (рис. 3).

Активные мощности узлов для режима 2 приведены в табл. 2.

Таблица 2. Описание режима 2 тестовой схемы

№ узла	P , МВт	P , о.е.
1	450	0,9
2	0	0
3	0	0
4	-50	-0,1
5	-50	-0,1
6	-50	-0,1
7	-50	-0,1
8	-250	-0,5

В данном режиме уставка пускового органа составляет 0,485 рад.

В момент времени 10,5 с происходит наброс нагрузки в узле 8. Срабатывание пускового органа происходит при активной мощности по Л78 (рис. 2) 540 МВт (рис. 4).

При активной мощности по Л78 (рис. 2) 470 МВт (при которой было срабатывание в режиме 1) фиксируется несрабатывание пускового органа (рис. 5).

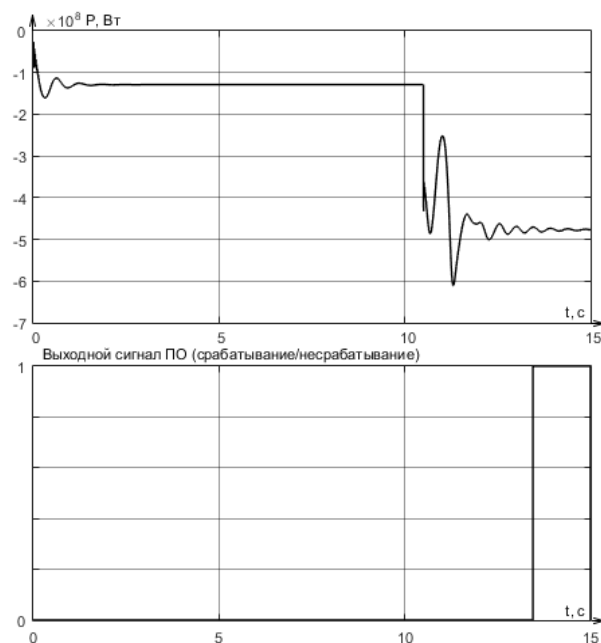


Рис. 3. Переток мощности по Л78 (срабатывание пускового органа в режиме 1 тестовой схемы)

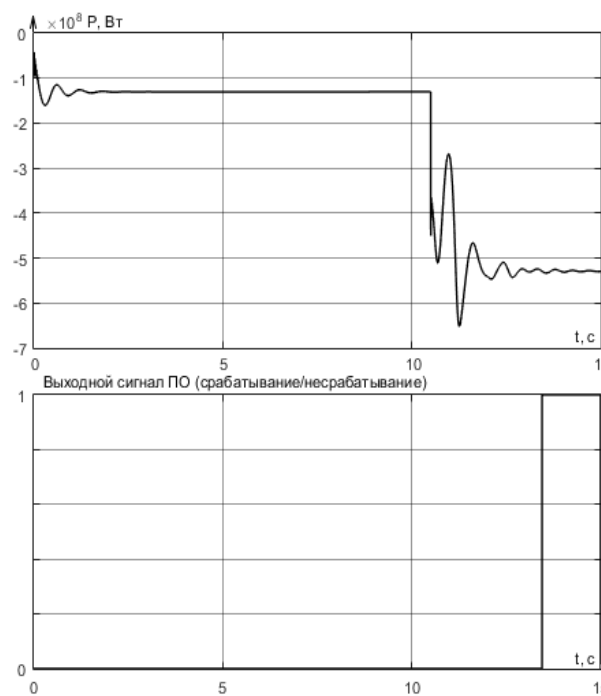


Рис. 4. Переток мощности Л78 (срабатывание пускового органа в режиме 2 тестовой схемы)

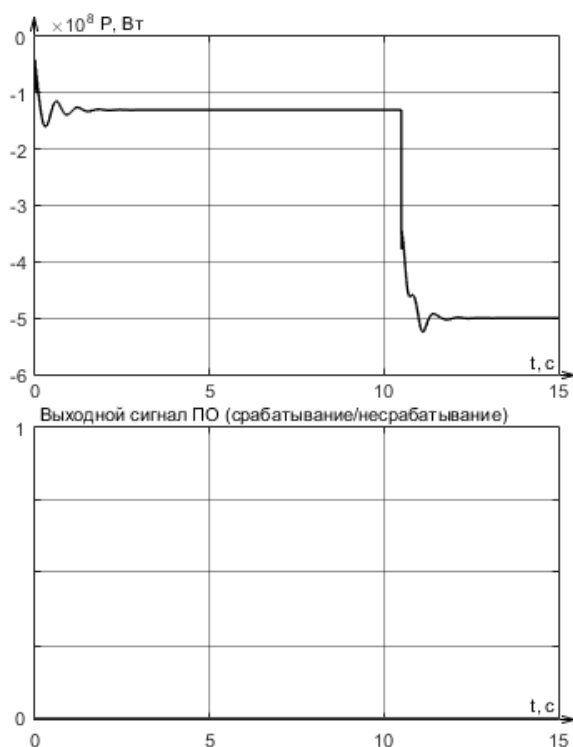


Рис. 5. Переток мощности по Л78 (несрабатывание пускового органа в режиме 2 тестовой схемы)

Результаты моделирования показали, что при разных значениях отборов активной мощности в узлах 4, 5 тестовой схемы (рис. 2) уставка пускового органа, установленного на Л78 (рис. 2), различная. В результате изменения уставок для каждого режима пусковой орган в режиме с большим значением отборов активной мощности в узлах 4, 5 срабатывает при перетоке активной мощности по Л78 (рис. 2) 470 МВт. При уменьшении отборов активной мощности в узлах 4, 5 на 100 МВт пусковой орган срабатывает при перетоке по Л78 (рис. 2) 540 МВт. При отсутствии адаптивной настройки пусковой орган имел бы одну уставку для обоих режимов, рассчитанную для худшего режима, т. е. срабатывал бы в обоих случаях при активной мощности по Л78 (рис. 2) 470 МВт. Это означает, что в режиме с меньшими отборами происходило бы искусственное занижение пропускной способности на 70 МВт. Иными словами, применение предложенной структурной схемы позволяет повысить пропускную способность сечения на 70 МВт при изменении промежуточных отборов на 100 МВт.

В рамках дальнейшего исследования эффективности разработанной структурной схемы адаптивного пускового органа проводилось моделирование выявления пусковым органом места и величины небаланса активной мощности в энергосистеме на тестовой схеме (рис. 2) в режиме 2.

Задавался небаланс в узле 8 в виде увеличения нагрузки в размере 1600 МВт и фиксировались выходные величины алгоритмов выявления места и величины небаланса активной мощности в энергосистеме. Результаты приведены на рис. 6, 7.

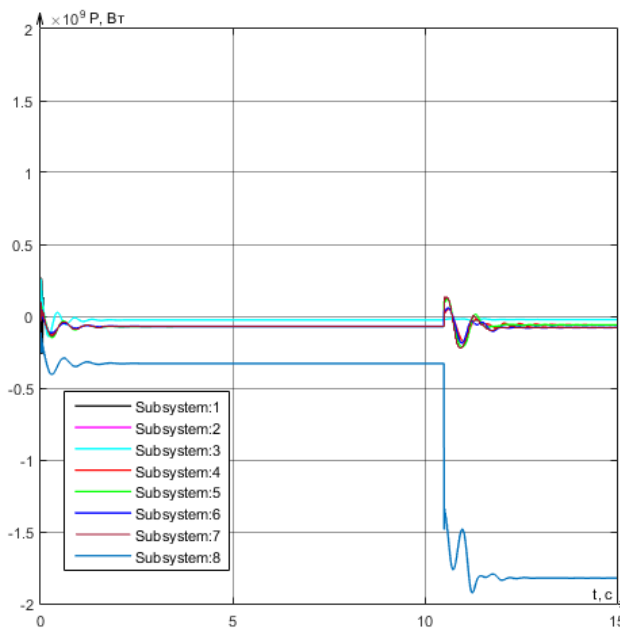


Рис. 6. Изменение мощности в узлах тестовой схемы

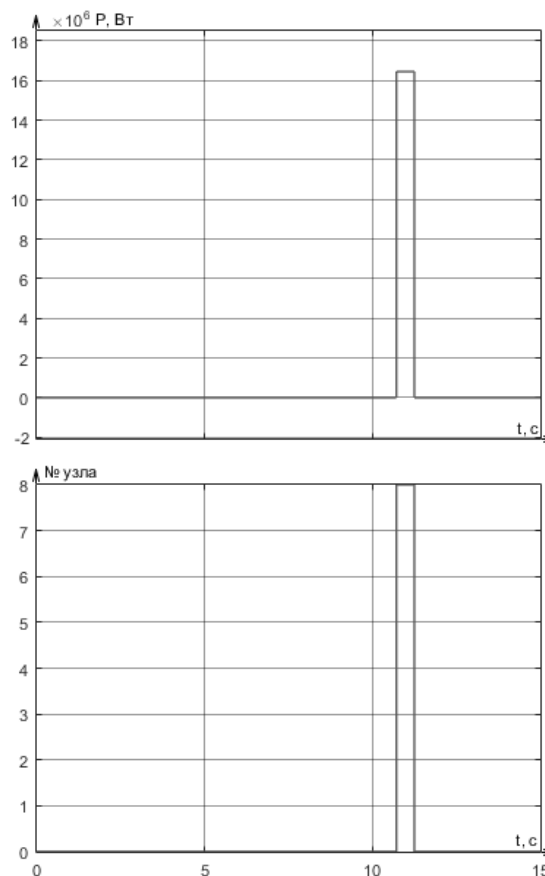


Рис. 7. Выходные величины алгоритмов выявления величины и места небаланса мощности в энергосистеме (величина небаланса и номер узла, в котором наблюдается небаланс)

Результаты моделирования показали, что пусковой орган выявляет небаланс активной мощности в том узле, в котором он был задан. Вычисленная пусковым органом величина небаланса мощности примерно равна заданной.

Выводы. Разработанная структурная схема адаптивного пускового органа АПНУ, выявляющего перегрузку сечения по углу между векторами напряжений по концам сечения, позволяет рассчитывать уставку пускового органа для существующих в реальном времени схемно-режимных условий и выявлять место и величину небаланса активной мощности в энергосистеме. Разработанная структурная схема АПНУ отличается тем, что содержит адаптивный пусковой орган. Предложенная структурная схема смоделирована в ПК Matlab. Результаты моделирования подтвердили, что пусковой орган является адаптивным к схемно-режимным условиям (уставка изменяется с изменением схемно-режимных условий) и адаптация позволяет повысить пропускную способность сечения. Также результаты моделирования показали, что пусковой орган корректно выявляет место и величину небаланса активной мощности в энергосистеме. Способность пускового органа выявлять место и величину небаланса активной мощности в энергосистеме дополнительно повысит его эффективность, что в дальнейшем позволит наиболее точно выбирать дозировку управляющего воздействия и место его реализации.

Список литературы

1. Кошечев Л.А., Шульгинов Н.Г. ЦСПА на базе алгоритмов нового поколения – очередной этап в развитии противоаварийного управления в энергосистемах // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – № (1)68. – С. 7–13.
2. Алгоритм оценки статической устойчивости и выбора управляющих воздействий по условию обеспечения статической устойчивости в послеаварийном режиме / Е.В. Исаев, П.Я. Кац, А.А. Лисицын и др. // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – № (1)68. – С. 48–56.
3. Иофьев Б.И. Автоматическое аварийное управление мощностью энергосистем. – М.: Энергия, 1974. – 415 с.
4. Глускин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. Т. I. – М.: Знак, 2009. – 568 с.
5. Глускин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. Т. II. – М.: Знак, 2011. – 528 с.
6. Ефремова И.Ю., Глускин И.З. Адаптивная настройка пускового органа противоаварийной автоматики для транзитов с промежуточными отборами мощности // Электричество. – 2017. – № 2. – С. 13–17.

Ефремова Ирина Юрьевна,

АО «РАСУ»; ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»», ведущий специалист отдела противоаварийной и системной автоматики; аспирант кафедры релейной защиты и автоматизации энергосистем, телефон +7(919)962-28-20, e-mail: i.u.efremova@yandex.ru

Efremova Irina Yuryevna,

JSC «RACS»; National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Chief Specialist of the Department of Emergency and Power System Automatic Control; Post-graduate Student of the Department of Relay Protection and Automation of Energy Systems, tel. +7(919)962-28-20, e-mail: i.u.efremova@yandex.ru

7. Ефремова И.Ю., Глускин И.З. Адаптивный пусковой орган ПА по углу в многомашинной схеме // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 2. – С. 44–51.

8. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

9. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электроэнергетических систем. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.

10. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 256 с.

11. Черных В.И. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Sim Power Systems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

References

1. Koshcheyev, L.A., Shulginov, N.G. *Izvestiya NTTs Edinoj energeticheskoy sistemy*, 2013, no. (1)68, pp. 7–13.

2. Isayev, E.V., Kats, P.Ya., Lisitsyn, A.A., Nikolayev, A.V., Ten, E.A. *Izvestiya NTTs Edinoj energeticheskoy sistemy*, 2013, no. (1)68, pp. 48–56.

3. Iofyev, B.I. *Avtomaticheskoe avariynoe upravlenie moshchnost'yu energosistem* [Automatic emergency power control of power systems]. Moscow, Energiya, 1974. 415 p.

4. Gluskin, I.Z., Iofyev, B.I. *Protivoavariynaya avtomatika v energosistemakh. T. I* [Automatic emergency control system in power systems. Vol. I]. Moscow, Znakh, 2009. 568 p.

5. Gluskin, I.Z., Iofyev, B.I. *Protivoavariynaya avtomatika v energosistemakh. T. II* [Automatic emergency control system in power systems. Vol. II]. Moscow, Znakh, 2011. 528 p.

6. Efremova, I.Yu., Gluskin, I.Z. *Elektrichestvo*, 2017, no. 2, pp. 13–17.

7. Efremova, I.Yu., Gluskin, I.Z. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2017, no. 2, pp. 44–51.

8. Venikov, V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transient electromechanical processes in electrical systems]. Moscow, Vysshaya shkola, 1985. 536 p.

9. Zhdanov, P.S. *Voprosy ustoychivosti elektroenergeticheskikh sistem* [Problems of electric power system stability]. Moscow, Energiya, 1979. 456 p.

10. Vazhnov, A.I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in alternating current machines]. Leningrad, Energiya. Leningradskoe otdelenie, 1980. 256 p.

11. Chernykh, V.I. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, Sim Power Systems i Simulink* [Modelling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press, 2008. 288 p.

Глушкин Игорь Захарович,

ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»,
доктор технических наук, профессор кафедры релейной защиты и автоматизации энергосистем.

Glouskin Igor Zakharovich,

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of the Department of Relay Protection and Automation of
Energy Systems.