

**BORODIN Dmitrii Nikolayevich** (JSC «PSAI», Novosibirsk, Russia) – Engineer

**ARGHANNIKOV Sergey Gavrilovich** (JSC «PSAI», Novosibirsk, Russia) – Senior Scientific Researcher

*Currently all the more relevant take the transient stability evaluation task of complex power systems on-line under the centralized system of emergency control. It's offered the control actions selecting algorithm for transient stability ensuring based on the idea of structurally organized synchronous machines wave motion in power system. Highlighting system-wide translational motion and the vibrational motion around system-wide, synchronous machines may be grouped into the subsystems. Identified structural representation of power system by the time of asynchronous mode starting, reduce the transient stability analysis problem to the assessment of two-generator system stability. To determine the control actions the theorem of kinetic energy is used.*

*Key words: power system, transient stability, control actions, system of emergency control*

#### REFERENCES

1. Arzhannikov S.G., Vtorushin A.S., Zakharkin O.V., Landman A.K., Petrov A.E., Popova Ye.Yu. *Izvestiya Nauchno-tehnicheskogo tsentra Yedinoi energeticheskoi sistemy – in Russ. (News of the Scientific and Technical Centre of the Unified Energy System)*, 2013, No. 1 (68), pp. 91–98.

2. Lisitsyn A.A., Edlin M.A. *Izvestiya Nauchno-tehnicheskogo tsentra yedinoi energeticheskoi sistemy – in Russ. (News of the Scientific and Technical Centre of Unified Energy System)*, 2013, No. 1 (68), pp. 41–47.

3. Lizalek N.N., Ladnova A.N., Tonyshev V.F., Danilov M.V., Mochalin K.S. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2011, No. 6, pp. 11–19.

\* \* \*

*Электричество, 2017, № 2, с. 13–17.*

## Адаптивная настройка пускового органа противоаварийной автоматики для транзитов с промежуточными отборами мощности

ЕФРЕМОВА И.Ю., ГЛУСКИН И.З.

*Предложен алгоритм адаптивной настройки пускового органа противоаварийной автоматики, выявляющего перегрузку сечения энергосистемы, опасную для сохранения статической устойчивости. Алгоритм отличается тем, что использует метод расчета статической устойчивости по знаку свободного члена характеристического уравнения энергосистемы и позволяет пусковому органу адаптироваться к режиму работы прилегающей сети. Адаптация пускового органа к режиму работы прилегающей сети позволит повысить пропускную способность сечения энергосистемы. Анализ эффективности предложенного алгоритма на примере энергосистемы Казахстана показал, что применение алгоритма позволяет повысить пропускную способность сечения энергосистемы.*

*Ключевые слова: энергосистема, статическая устойчивость, область устойчивости, максимально допустимая мощность, пропускная способность сечения, противоаварийная автоматика*

В нормальном режиме электроэнергетической системы (ЭЭС) перегрузка сечений, развивающаяся постепенно или возникающая внезапно, как аварийное возмущение может привести к нарушению статической устойчивости. Решение проблем устойчивости энергосистемы возлагается на систему противоаварийной автоматики (ПА), которая осуществляет выявление аварийной ситуации (пусковые органы), определяет дозировку управляющих воздействий и осуществляет реализацию управляющих воздействий.

В настоящее время особое внимание уделяется усовершенствованию устройств дозировки управ-

ляющих воздействий. Главным примером этому является создание и модернизация централизованной системы противоаварийного управления (ЦСПА). Основная цель данной системы – адаптивный выбор управляющих воздействий ПА [1, 2].

В статье рассматривается пусковой орган (ПО) ПА, выявляющий перегрузку сечения энергосистемы, опасную для статической устойчивости параллельной работы энергосистем, путем измерения активной мощности в месте установки ПО.

В настоящее время настройка ПО ПА базируется на двухмашинном представлении сложной многомашинной энергосистемы. Сложная сеть пред-

ставляется совокупностью двухмашинных эквивалентов. Для каждого сечения приходится выбирать худший случай по режиму всей недоступной для контроля части энергосистемы. При такой настройке ПО имеют одну уставку для различных как стационарных, так и переходных режимов работы энергосистемы. Данное упрощение ведет к излишним срабатываниям ПО, что не позволяет полностью использовать пропускную способность сечения энергосистемы. Вопрос о выявлении аварийной перегрузки — один из наименее проработанных в ПА, что не соответствует актуальности проблемы. Недостаточное развитие принципов выявления перегрузки вызывает несовершенные решения. Отсюда — неправильные срабатывания органов, выявляющих перегрузку [3–6].

В то же время, режим работы прилегающей сети не может не влиять на пропускную способность сечения энергосистемы, и это влияние необходимо учитывать при настройке ПО ПА. Были проведены исследования зависимости пропускной способности сечения энергосистемы от режима работы прилегающей сети на примере энергосистемы Казахстана. Одним из «узких мест» данной энергосистемы является транзит 500 кВ «Север–Юг» протяженностью около 1000 км, соединяющий электрические сети Северного Казахстана, где сосредоточены мощные электростанции, и Южного Казахстана, где находится мощная нагрузка. На указанном транзите имеются промежуточные энергосистемы: Жезказганский и Темиртауский энергоузлы. Результаты исследования пропускной способности транзита «Север–Юг» в программном комплексе (ПК) RastrWin показали, что при дефиците Жезказганского энергоузла 100 МВт и профиците Темиртауского промузла 100 МВт максимально допустимый переток по указанному транзиту 1574 МВт, при увеличении дефицита Жезказганского энергоузла до 500 МВт и дефицита Темиртауского промузла до 300 МВт максимально допустимый переток по транзиту снижается до 1232 МВт. Иными словами, исследования выявили существенную зависимость пропускной способности транзита от режима работы прилегающей сети.

В указанных условиях актуальной задачей является адаптация ПО ПА к режиму работы прилегающей сети. В статье рассмотрены разработка алгоритма адаптивной настройки ПО ПА и анализ эффективности данной настройки.

Алгоритм настройки ПО ПА предлагается на основе анализа статической аperiodической устойчивости с помощью оценки знака свободного члена характеристического уравнения энергосистемы. Устойчивым является режим, в котором значение свободного члена характеристического уравнения

больше нуля. Границей устойчивости является режим, в котором значение свободного члена характеристического уравнения равно нулю. Указанный метод известен, но не применялся ранее в ПА, так как реализовать его не позволяли возможности существующей аппаратуры. В настоящее время появление новых технологий позволяет реализовать данный метод. Преимущество данного метода в том, что нарушение устойчивости фиксируется по прямому признаку [7–9].

Алгоритм настройки. 1. Ввод в систему исходных данных, полученных от системы телеизмерений  $((P_i, E_i)$ , а также данных от системы телесигнализации  $(T_j, u_{ij})$ . При изменении состояния элементов схемы сигналы об отключении/включении элементов также вводятся в систему посредством системы телесигнализации.

2. Расчет значения свободного члена характеристического уравнения ЭЭС ( $a$ ).

3. Определение оптимальной траектории утяжеления режима:

1) в одном из узлов увеличивается значение мощности;

2) рассчитывается новое значение свободного члена характеристического уравнения;

3) определяется  $\Delta P / \Delta \alpha$ , где  $\Delta P$  — изменение мощности в узле;  $\Delta \alpha$  — изменение значения свободного члена характеристического уравнения;

4) процесс повторяется для других узлов;

5) выбирается узел, для которого значение  $\Delta P / \Delta \alpha$  минимально; следовательно, при увеличении мощности в данном узле траектория утяжеления оптимальна (т.е. режим идет кратчайшим образом к границе устойчивости).

Для утяжеления режима необходимо увеличивать мощность в том узле, изменение мощности в котором оказывает наибольшее влияние на значение свободного члена характеристического уравнения.

4. Утяжеление режима по полученной траектории, получение предельного по условию статической аperiodической устойчивости режима ЭЭС. Предельным является режим, в котором значение свободного члена характеристического уравнения системы равно нулю.

5. Расчет потокораспределения активной мощности по контролируемым сечениям в полученном предельном режиме (сечение, где устанавливается ПО).

6. Выбор уставки ПО. Уставкой ПО, установленного на контролируемом сечении, является значение перетока мощности по данному сечению в предельном режиме по условию статической аperiodической устойчивости с учетом запаса, которое определяется следующим образом:

$$P_{\text{ср}} = k_{\text{зап}} P_{\text{max}} - \Delta P_{\text{н.к}},$$

где  $\Delta P_{\text{н.к}}$  – мощность нерегулярных колебаний;  
 $k_{\text{зап}}$  – коэффициент запаса.

Структурная схема ПА при такой настройке на примере семиузловой схемы приведена на рис. 1.

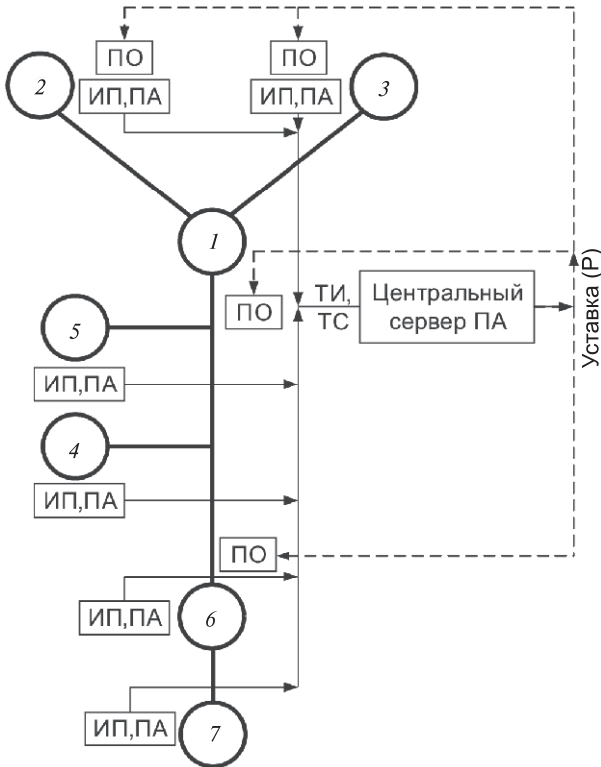


Рис. 1. Структурная схема ПА: ИП– измерительные преобразователи; ПА – противоаварийная автоматика (устройства фиксации отключения элементов сети; ТИ – телеизмерения; ТС – телесигнализация; ПО – пусковой орган

Данный расчет повторяется периодически, уставка ПО изменяется с изменением схемы и режима работы прилегающей сети, нарушение устойчивости фиксируется по прямому признаку. Таким образом, устройство адаптируется к режиму работы энергосистемы, что сокращает количество излишних срабатываний и повышает пропускную способность сечения.

Исследование эффективности предложенного алгоритма было проведено на тестовой энергосистеме, схема которой приведена на рис. 2; параметры схемы:

$T1 - X = 20 \text{ Ом}$ ,  $K_T = 0,048$ ;  $T2, T3, T4 - X = 20 \text{ Ом}$ ,  $K_T = 0,06$ ;  $Л1-2 - X = 25 \text{ Ом}$ ;  $Л2-3, Л2-4 - X = 50 \text{ Ом}$ ;  $H1 - P = 300 \text{ МВт}$ ;  $H2 - 200 \text{ МВт}$ ;  $H3 - 500 \text{ МВт}$ ;  $H4 = 100 \text{ МВт}$ .

При анализе статической устойчивости параллельной работы сложных энергосистем принимаются следующие допущения:

неучет электромагнитных переходных процессов в цепях статоров генераторов и других элементах энергосистемы;

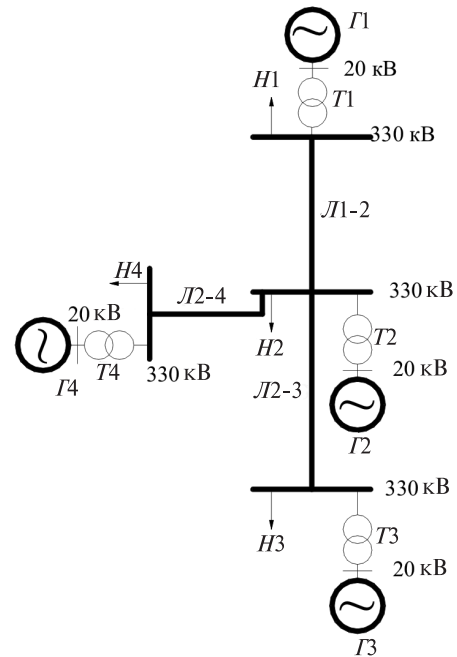


Рис. 2. Схема тестовой энергосистемы ( $G1 - TBM=500/24 \text{ кВ}$ ;  $G2, G3, G4 - TGV=300/20 \text{ кВ}$ )

отказ от рассмотрения колебательной неустойчивости, которая может быть ликвидирована с помощью организации управления по каналам стабилизации режимов (управлением по производным режимных параметров (АРВ)); нарушение статической устойчивости колебательного типа может быть исключено подбором соответствующих коэффициентов регулирования режимных параметров [8];

моделирование нагрузок в виде постоянного отбора активной мощности; возможность такого представления обусловлена результатами исследований [9], которые говорят о том, что в реальных энергосистемах регулирующий эффект по напряжению активных составляющих нагрузок мал и близок к случаю постоянного отбора мощности; неучет активных сопротивлений элементов сети.

При принятии указанных допущений границы области существования режима совпадают с границами области статической аperiodической устойчивости.

Уставки рассчитывались для линии 2–3 в ПК Mathcad. Для начала был проведен поиск оптимальной траектории утяжеления. Для этого были рассчитаны значения  $dP/d\alpha$  для всех направлений (2–3, 2–4, 2–1). Результаты расчета при изменении мощности в узле на 500 МВт:

Узел	Направление	Значение $dP/d\alpha$
3	2–3	$1,627 \cdot 10^{11}$
4	2–4	$2,418 \cdot 10^{11}$
1	2–1	$3,108 \cdot 10^{11}$

Наименьшее значение  $dP/d\alpha$  достигается при изменении мощности в узле 3, т.е. это изменение мощности наиболее сильно влияет на устойчивость. Соответственно, при расчете уставок пускового органа, установленного на линии 2–3 в узле 2, необходимо утяжелять схему в направлении узла 3 (увеличивать мощность в этом узле).

Далее было проведено утяжеление режима (увеличение мощности в узле 3) до получения предельного режима ( $\alpha=0$ ) и рассчитано значение перетока мощности по линии 2–3 в полученном предельном режиме. По данным значениям была рассчитана уставка по мощности ПО в сечении 2–3. Также был проведен аналогичный расчет уставок при увеличении нагрузки в узле 2 на 200 МВт (при расчете уставки по мощности был взят запас в 8%):

Режим	Максимально допустимый переток при $\alpha = 0$ , МВт	Уставка ПО по мощности, МВт
Без увеличения нагрузки в узле 2	799	735,806
Увеличение нагрузки в узле 2 на 200 МВт	699	643,986

Из приведенных данных видно, что при изменении нагрузки в узле 2 на 200 МВт значение уставки ПО, установленного на линии 2–3, меняется на 92 МВт, иными словами, при использовании предложенного алгоритма расчета уставок можно увеличить пропускную способность линии на 92 МВт.

Для проверки точности расчета максимально допустимых перетоков в ПК Mathcad указанные режимы работы были реализованы в ПК ДАКАР. Расчеты в ПК ДАКАР показали, что максимальный допустимый переток по линии 2–3 при  $\alpha=0$  составляет 765 МВт без увеличения нагрузки в узле 2 и 676 МВт с увеличением нагрузки в узле 2. Сравнив результаты расчета в ПК Mathcad и ПК ДАКАР, можно сделать вывод, что погрешность расчетов максимально допустимых перетоков в ПК Mathcad составляет 3,1–4,4%, т.е. перетоки мощности рассчитываются с высокой точностью.

Эффективность предложенного алгоритма была исследована на энергосистеме Казахстана (рис. 3). Были рассчитаны уставки пускового органа ПА по мощности, установленного в сечении «Север–Юг» для разных режимов работы энергосистемы (для различных значений мощностей нагрузок в промежуточных узлах сечения «Север–Юг»).

Уставки ПО ПА (автоматики от наброса мощности – АНМ), установленного в сечении 6–7, при разных значениях мощности нагрузок в узлах 4 и 5 были следующими:

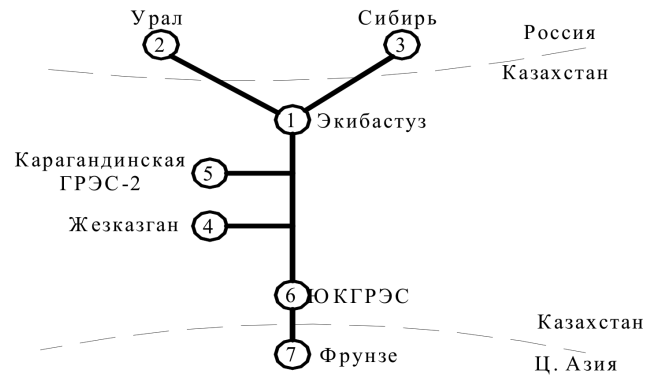


Рис. 3. Упрощенная схема энергосистемы Казахстана

Дефицит мощности, МВт		Уставки АНМ, МВт
узла 5	узла 4	
300	500	1130
100	300	1315
100	100	1415

Из приведенных данных видно, что уставка АНМ в зависимости от режима работы прилегающей сети изменяется на 285 МВт.

**Вывод.** Предложенный алгоритм адаптивной настройки ПО ПА анализирует статическую апериодическую устойчивость по знаку свободного члена характеристического уравнения и позволяет пусковому органу адаптироваться к режиму работы прилегающей сети. Проведенный анализ эффективности указанного алгоритма на примере энергосистемы Казахстана показал, что использование алгоритма позволит повысить пропускную способность сечения на 285 МВт.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошеев 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. Исаев Е.В., Кац П.Я., Лисицын А.А., Николаев А.В., Тен Е.А. Алгоритм оценки статической устойчивости и выбора управляющих воздействий по условию обеспечения статической устойчивости в послеаварийном режиме. – Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2013, № (1) 68, с. 48–56.
3. Глушкин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах, т. I. – М.: Знак, 2009, 568 с.
4. Глушкин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах, т. II. – М.: Знак, 2011, 528 с.
5. Иофьев Б.И. Автоматическое аварийное управление мощностью энергосистем. – М.: Энергия, 1974, 415 с.
6. Иофьев Б.И. Функционирование противоаварийной автоматики. – Сб. науч. Трудов «Вопросы противоаварийной автоматики электроэнергетических систем» – М.: Энергоиздат, 1982, с. 85–94.
7. Дехтерев А.И. Идентификация модели и контроль устойчивости ЭЭС по данным синхронизированных измерений: Дис.... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2011, 197 с.



8. **Осовенко В.В.** Выбор рационального метода утяжеления для расчетов статической устойчивости при проектировании энергосистем: Дис.... канд. техн. наук. — М., 1983, 174 с.

9. **Герасимов А.С.** Разработка методики, алгоритмов и программного комплекса для экспресс-анализа устойчивости и безытерационного расчета области существования режима сложного энергообъединения в пространстве активных мощностей генераторов: Дис.... канд. техн. наук. — С.Пб., АО НИИПТ, 2002, 124 с.

[31.08.2016]

*А в т о р ы : Ефремова Ирина Юрьевна окончила электроэнергетический факультет Ивановского государственного энергетического университета в*

*Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 1, pp. 13–17.*

*2010 г. Ведущий инженер департамента противоаварийной автоматики АО «ОРЗАУМ», аспирант кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» РЗиАЭС Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»).*

*Глускин Игорь Захарович окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1967 г. В 2005 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка иерархической, эшелонированной системы противоаварийного управления электроэнергетическими объединениями». Профессор кафедры РЗиАЭС НИУ «МЭИ».*

## Adaptive Tuning of the Emergency Control System for Transmission Systems with Intermediate Power Takeoff Points

**YEFREMOVA Irina Yur'yevna** (Public Company «ORZAUM», Moscow, Russia) — Leading Engineer, Ph.D. student of National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»)

**GLUSKIN Igor' Zakharovich** (NRU «MPEI», Moscow Russia) — Professor of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

*The article proposes an algorithm for adaptively tuning the emergency control system starting element that reveals overloading of a power system cut set jeopardizing its steady state stability. The algorithm distinguishing feature lies in the fact that it uses the method of analyzing steady-state stability by the sign of the power system characteristic equation's absolute term and allows the emergency control system starting element to adapt to the operating conditions of the adjacent network. With the starting element adapted to the adjacent network operating conditions, a higher transmission capacity of the power system cut set can be achieved. The efficiency of the proposed algorithm was analyzed taking the Kazakhstan power system as an example, and it has been demonstrated that application of the algorithm allows a higher transmission capacity of the power system cut set to be obtained.*

**Key words:** power system, steady-state stability, domain stability, maximum admissible power, cut set transmission capacity, emergency control system

### REFERENCES

1. **Koshcheyev L.A., Shul'ginov N.G.** *Izvestiya NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy — in Russ. (News of Scientific Technical Centre of Unified Energy System — STC UES)*, 2013, No. (1)68, pp. 7–13.

2. **Isayev Ye.V., Kats P. Ya., Lisitsyn A.A., Nikolayev A.V., Ten Ye.A.** *Izvestiya NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy — in Russ. (STC UES)*, 2013, No. (1)68, pp. 48–56.

3. **Gluskin I.Z., Iof'yev B.I.** *Protivoavariinaya avtomatika v energosistemakh, t. I* (Emergency control schemes in power systems, vol. I). Moscow, Publ. «Znack», 2009, 568 p.

4. **Gluskin I.Z., Iof'yev B.I.** *Protivoavariinaya avtomatika v energosistemakh, t. II* (Emergency control schemes in power systems, vol. II). Moscow, Publ. «Znack», 2011, 528 p.

5. **Iof'yev B.I.** *Avtomaticheskoye avariinoye upravleniye moshchnost'yu energosistem* (Automatic emergency operation of power systems power). Moscow, Publ. «Energiya», 1974, 415 p.

6. **Iof'yev B.I.** *Sbornik nauchnykh trudov «Voprosy protivoavariinoy avtomatiki elektroenergeticheskikh sistem» — in Russ.*

(Collection of scientific works «Problems of emergency control of electric power systems»). Moscow, Energoizdat, 1982, pp. 85–94.

7. **Dekhterev A.I.** *Identifikatsionnyye modeli i kontrol' ustoichivosti EES po dannym sinkhronizirovannykh izmereniy* (Model identification and control of stability energy systems according to the synchronized measurements). Diss. for the degree of Cand. Sci. (Eng.). Novosibirsk, 2011, 197 p.

8. **Osovenko V.V.** *Vybor ratsional'nogo metoda utyazheleniya dlya raschetov staticheskoy ustoichivosti pri proektirovanii energosistem* (The choice of a rational method of weighting for the calculation of static stability in the design of power systems). Diss. for the degree of Cand. Sci. (Eng.). Moscow, 1983, 184 p.

9. **Gerasimov A.S.** *Razrabotka metodiki, algoritmov i programmnoy kompleksa dlya ekspress-analiza ustoichivosti i bezыteratsionnogo rascheta...* (Development of techniques, algorithms and software for rapid analysis of stability noniteration calculations...). Diss. For the degree of Cand. Sci. (Eng.). St. Petersburg, 2002, 124 p.