

## АНАЛИЗ СЕНСОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ И ВЫЯВЛЕНИЕ СЛАБЫХ МЕСТ В СЕТЯХ ГЕНЕРАТОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

**М.А. Тремасов, А.В. Малафеев**

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск, Россия*

На крупных промышленных предприятиях кроме внешних источников электроэнергии (энергосистемы) имеются собственные источники электрической и тепловой энергии, от стабильной и устойчивой работы которых зависит работа основного технологического оборудования предприятия. Поэтому обеспечение стабильной работы как механизмов собственных нужд электростанций, так и основного технологического оборудования промышленного предприятия является актуальной задачей при новом проектировании электрических сетей или их реконструкции. Повышение надежности системы электроснабжения осуществляется различными способами, одним из которых является выявление и анализ сенсорных (чувствительных) элементов схемы с целью дальнейшего устранения слабых мест, а также неоднородностей системы. Таким образом, в работе в качестве объекта исследования рассматривалась сложная сеть генераторного напряжения промышленного предприятия, имеющая связь с системой через подстанции высокого и сверхвысокого напряжения и включающая в себя тепловые электростанции с механизмами собственных нужд и высоковольтных промышленных потребителей предприятия и насосных станций. Для выявления сенсорных элементов схемы была выполнена серия расчетов электромеханических переходных процессов при моделировании коротких замыканий в сети в программном комплексе «КАТРАН 10.0», на основе которых осуществлена оценка устойчивости синхронных и асинхронных двигателей за счет определения степени отклонения параметров их режима работы. По результатам расчетов определено, что наибольшей чувствительностью обладают механизмы собственных нужд электростанций, а максимальное отклонение параметров режима достигается при коротких замыканиях на уровнях высокого напряжения. Методика анализа сенсорных элементов схемы позволяет повысить надежность работы системы электроснабжения промышленного предприятия при сильных возмущениях в сети.

*Ключевые слова:* электрические станции, собственные нужды, рабочие характеристики, динамическая устойчивость, самозапуск двигателей, короткие замыкания, сенсорные элементы.

### Введение

Короткие замыкания (КЗ) в сети, которые могут привести к нарушению устойчивости системы электроснабжения крупного предприятия, являются наиболее тяжелыми авариями. Они могут повлечь за собой расстройство сложных технологических процессов предприятия, массовый недоотпуск продукции, а также, в случае наличия собственных электростанций, нарушение нормальной работы генераторов и выход электростанции на отдельную работу с энергосистемой. Такой режим работы отрицательно сказывается на динамической устойчивости генераторов, что приводит к нарушению электроснабжения наиболее ответственных потребителей и необходимости синхронизировать генераторы для восстановления параллельной работы с энергосистемой [1–3].

Для исследования устойчивости механизмов расчета установившихся режимов бывает недостаточно, поэтому применяют также расчеты переходных электромеханических процессов [4–6], в которых учитываются собственные характеристики и технические параметры генераторов, мощных электродвигателей, обобщенной нагрузки. Так, например, поведение генераторов в переходном процессе определяет устойчивость системы, что во

многих исследованиях является одним из показателей устойчивости.

При КЗ в питающей сети 110–220 кВ наиболее вероятно нарушение динамической и результирующей устойчивости [7, 8]. Поэтому анализ подобных режимов представляет интерес с точки зрения определения необходимых условий для сохранения устойчивости системы.

Для сохранения стабильной работы системы электроснабжения большое внимание уделяется исследованию статической [9–11] и динамической [12–15] устойчивости. Тем не менее во многих исследованиях [16, 17] рассматриваются мощные генераторы, работающие в сетях с большой пропускной способностью. Кроме того, исследуется работа генераторов в пределах одной станции. С точки зрения реальных условий эксплуатации электрических сетей генераторы различных электростанций электрически удалены друг от друга через реакторы и трансформаторы, система электроснабжения имеет сложные связи с различной пропускной способностью, влияющей на баланс мощности, в сети присутствует неоднородная электрическая нагрузка [18, 19].

С целью выявления наиболее чувствительных элементов схемы для улучшения поведенческих

свойств электроэнергетической системы (ЭЭС) (управляемости, надежности, контролируемости) О.Н. Войтовым вместе с соавторами [20] был введен термин «сенсорный элемент», т. е. такой элемент сети, параметры режима которого в большей степени изменяются при случайных изменениях в топологии схемы сети и нагрузок. В такой работе анализ реакции ЭЭС на возмущение определяется изменениями во времени углов роторов синхронных генераторов. Степень неоднородности анализируется наличием когерентных генераторов при возмущениях. Одним из мероприятий по снижению неоднородности ЭЭС и, как следствие, исключение сенсорных элементов схемы является изменение проводимостей связей в ЭЭС.

Анализ слабых мест во многих работах связан с определением близости или непосредственного достижения нарушения либо статической, либо динамической устойчивости. В результате такого анализа определялись наиболее слабые связи с низкой пропускной способностью, в которых возникающие перетоки мощности достигали некоторых пределов. Достижение этих пределов осуществлялось, как правило, утяжелением режимов работы сильными возмущениями в системе.

Также поиск слабых мест может осуществляться по следующей методике [21]: для определенного режима работы энергосистемы, содержащей генераторы большой мощности, вводится некоторое аварийное возмущение. После расчета аварийного режима определяется наиболее загруженная линия, которая перед новым этапом расчета отключается, после чего рассчитывается новый режим. Вычисления продолжаются, пока не будет найден участок в системе с нарушением статической или динамической устойчивости, в зависимости от поставленной перед этим задачи. Недостатком таких методов является необходимость проведения многочисленных объемных расчетов, а также объемного аналитического анализа и обработки полученных результатов.

Существуют аналитические алгоритмы выявления слабых мест в системе с точки зрения статической устойчивости, одним из которых является метод кластерного анализа [22]. В таком методе не требуются объемные матричные вычисления, а при использовании теории графов находятся кластеры, узлы которых больше всего коррелируют между собой. Эти узлы в свою очередь связаны слабыми линиями, которые и являются сенсорными элементами схемы.

Кластерный анализ также применяется и для исследования динамической устойчивости, где внимание уделяется поведению генераторов в переходных электромеханических процессах.

Таким образом, для решения задачи выявления слабых мест в системе электроснабжения существуют различные подходы, каждый из которых обладает определенными преимуществами и не-

достатками. Наибольшей точности в расчетах можно достичь, учитывая технические характеристики электрооборудования (генераторы, двигатели, линии) и параметры его режима работы, что приводит к усложнению расчетов.

### Методика

В ранних работах по исследованию устойчивости механизмов собственных нужд (СН) тепловых электростанций [23] рабочие характеристики механизмов применялись в расчетах в качестве аппроксимированных кривых паспортных рабочих характеристик. В реальности на электростанциях в технологическом процессе производства электроэнергии участвуют механизмы с различными режимами работы. Например, насосы работают на сеть с разным противодействием. Имеются различия и самих механизмов: по мощности, напряжению, скорости вращения рабочего колеса и т. д. Поэтому при исследовании устойчивости механизмов СН на точность и корректность результатов влияют уточненные параметры исследуемого оборудования и сети в целом. Так, ранее авторами в [24] был разработан алгоритм построения теоретической напорной характеристики насоса, работающего на трубопроводную сеть с определенной производительностью. Суть методики заключается в аналитическом выражении напорной рабочей характеристики насоса, близкой на всем диапазоне подачи к паспортной характеристике, с учетом потерь на удар и вихреобразование и гидравлических потерь при протекании потока жидкости через рабочее колесо насоса.

Но для анализа самозапуска приводного двигателя необходимо получить аналитическое выражение моментно-скоростных характеристик механизма. Такие уточненные статические характеристики были получены в работе [25], где приведены алгоритмы расчета в различных режимах работы насоса: в насосном режиме, в режиме противотока и в турбинном режиме. В отличие от упрощенных методик разработанная методика получения моментно-скоростных характеристик позволяет учитывать конструктивные параметры механизмов, а также гидравлические потери полезного момента и тем самым получить более точные данные об электромеханических процессах в приводном синхронном или асинхронном двигателе центробежной машины в различных режимах работы.

Кроме того, в работе по анализу устойчивости двигателей собственных нужд тепловых электростанций с учетом характеристик приводных механизмов [26] с целью апробации методики были выявлены сенсорные элементы схемы в рамках одного объекта исследования – тепловой электростанции. Но для исследования устойчивости всей системы электроснабжения и выявления чувствительных элементов схемы этого недостаточно, поэтому в настоящей работе исследуется северная

часть Магнитогорского энергоузла, а именно основные потребители электростанций и насосных станций, получающих питание с шин генераторного напряжения.

Выявление сенсорных элементов схемы проводилось на примере промышленных электростанций (ЦЭС, ПВЭС-1, ПВЭС-2), насосных станций первого и второго подъема северной части Магнитогорского энергетического узла. Обоснованием выбора этой части системы является сложная структура сети генераторного напряжения при большом количестве и мощности ответственных потребителей, относящихся к I категории по надежности электроснабжения, например, механизмы СН электростанций и насосы насосных станций, подающие воду для охлаждения доменных печей. Упрощенная схема электрических соединений приведена на рис. 1, где утолщенными линиями показаны сети генераторного напряжения, связывающие распределительные устройства электростанций с промышленными подстанциями. Основные потребители насосных станций получают питание со следующих подстанций: н/ст № 1 (12,3 МВт) – п/ст № 5, н/ст № 1А (14,6 МВт) – п/ст № 5А, н/ст № 2 (12,9 МВт) – п/ст № 2, 7, 26, н/ст № 17 (16,1 МВт) – п/ст № 78, н/ст № 20 (16,8 МВт) – п/ст № 79, н/ст № 25 (5,4 МВт) – п/ст № 26. Приводными двигателями насосов являются высоко-

вольтные асинхронные двигатели, нерегулируемые и с реостатным регулированием, и синхронные двигатели с тиристорным возбуждением. Распределительные устройства электростанций являются двухсекционными. Параметры генераторов электростанций, входящих в границы объекта исследования, приведены в таблице.

Полученные методики уточненного расчета моментно-скоростных характеристик [24, 26] были интегрированы в программный комплекс «КАТРАН 10.0» [27] для расчета электромеханических переходных процессов при КЗ в сети. Таким образом, в расчете предусмотрен статический момент, полученный на основе разработанной методики, где учитываются как конструктивные параметры механизма, так и характеристика трубопроводной сети.

Для выявления сенсорных элементов схемы были проведены серии моделирования КЗ в программном комплексе «КАТРАН 10.0» длительностью 2,5 с на секциях шин электростанций и распределительных устройств (РУ) насосных станций. Были получены зависимости различных параметров двигателей и генераторов, одним из которых является скольжение двигателей. В отличие от исследования неоднородности ЭЭС на основе взаимных углов роторов генераторов и, соответственно, их когерентности [20], в настоящей работе

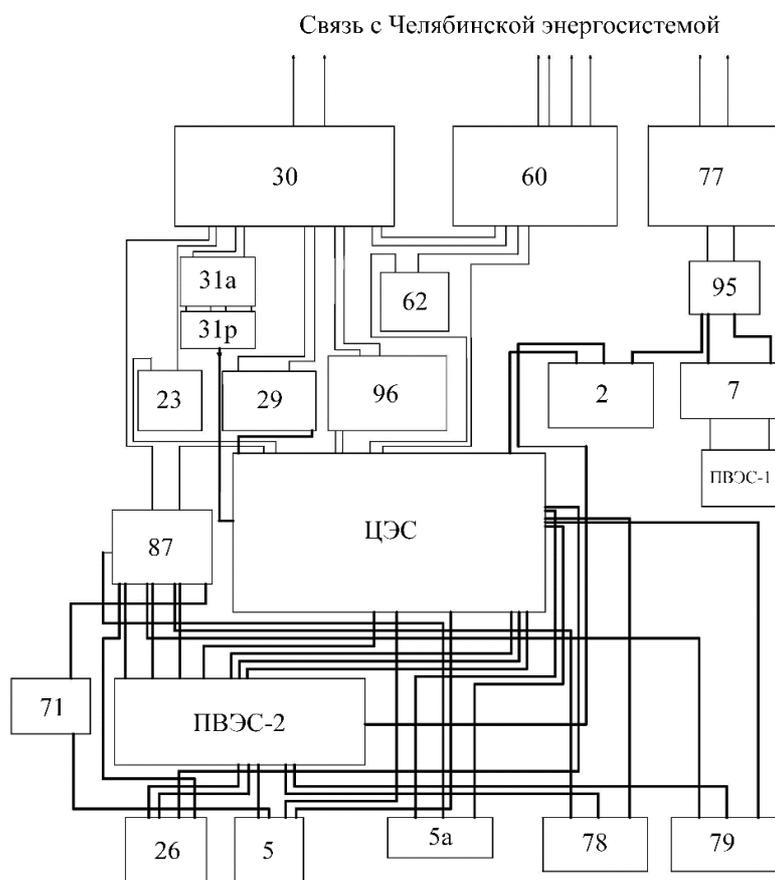


Рис. 1. Упрощенная схема северной части Магнитогорского энергоузла

Основные номинальные параметры генераторов

Наименование	Номинальная мощность $P_{ном}$ , МВт	Номинальное напряжение $U_{ном}$ , кВ
ЦЭС, ТГ № 1	12	3,15
ЦЭС, ТГ № 2	12	3,15
ЦЭС, ТГ № 3	40	10,5
ЦЭС, ТГ № 4а	6	10,5
ЦЭС, ТГ № 4б	6	10,5
ЦЭС, ТГ № 5	25	10,5
ЦЭС, ТГ № 6	50	10,5
ЦЭС, ТГ № 7	25	10,5
ЦЭС, ТГ № 8	40	10,5
ПВЭС-1, ТГ № 1	6	6,3
ПВЭС-1, ТГ № 2	6	6,3
ПВЭС-2, ТГ № 1	30	6,3
ПВЭС-2, ТГ № 2	30	10,5
ПВЭС-2, ТГ № 3	12	10,5
ПВЭС-2, ТГ № 4	30	10,5

выявление слабых мест, т. е. неоднородных участков сети, осуществляется с помощью значений забросов скольжения приводных двигателей центробежных машин в аварийном режиме (при КЗ). Таким образом, для определения степени влияния возмущения применена разность полученных значений скольжений, а для оценки степени возмущения рассчитан коэффициент возмущения в точках присоединения потребителей схемы, т. е. таких потребителей, которые получают питание с общих шин РУ подстанций:

$$\sigma = \frac{P_1 \Delta s_1 + P_2 \Delta s_2 + \dots + P_n \Delta s_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n},$$

где  $P$  – мощность приводного двигателя;  $\Delta s = s_{\max} - s_{\min}$  – разность максимального и минимального скольжений на исследуемом интервале времени.

Таким образом, разработанная методика выявления сенсорных элементов схемы состоит из следующих основных этапов:

1) определение основных конструктивных параметров и расчет уточненных моментно-скоростных характеристик центробежных машин на основе ранее полученных выражений потерь полезного момента;

2) ввод исходных данных в программный комплекс «КАТРАН 10.0», содержащий уточненный расчет моментно-скоростных характеристик;

3) расчет в программном комплексе электро-механических переходных процессов при моделировании КЗ в различных участках схемы, т. е. утяжеление режима работы системы до возможного нарушения статической или динамической устойчивости;

4) получение данных об изменениях скольжений двигателей в исследуемой схеме по результатам расчетов при моделировании аварийных режимов;

5) определение коэффициентов возмущения в точках присоединения потребителей, и расчет средних значений коэффициентов для каждой точки при различных аварийных режимах;

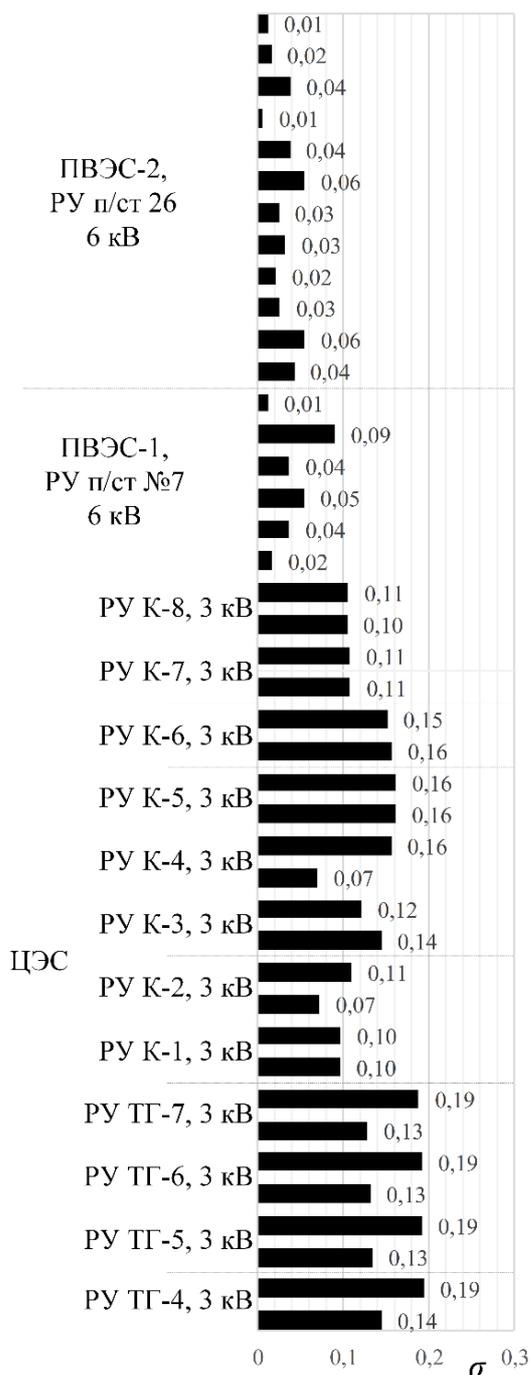
6) выявление сенсорных элементов схемы по наибольшим значениям коэффициентов возмущения;

7) формулирование выводов о наиболее чувствительных участках схемы к возмущениям и об устойчивости системы электроснабжения.

### Результаты

По результатам моделирования КЗ на секциях шин РУ электростанций и подстанций на разных уровнях напряжения были получены значения скольжений двигателей. Для каждой точки КЗ выполнен расчет коэффициента чувствительности всех элементов ЭЭС (секций шин, от которых получают питание потребители предприятия, двигательная нагрузка). Для всех точек КЗ были рассчитаны средние значения коэффициентов чувствительности, которые показаны на рис. 2.

Степень возмущения двигательной нагрузки в целом влияет на общее состояние системы. Как правило, наибольшей сенсорностью обладают электропотребители, находящиеся ближе остальных к источнику возмущения. Также на максимальное отклонение от нормального режима влияют качания генераторов. При проворотах ротора генераторов наблюдается утяжеление режима, приводящее к еще большему возмущению сенсоров. Кроме того, КЗ на высоких уровнях напряжения оказывает влияние на большее количество потребителей, в том числе и на генераторы, от устойчивости которых зависит работа не только механизмов СН станции, но и цеховых потребителей предприятия.



**Рис. 2. Значения коэффициентов возмущения в точках подключения потребителей**

Как видно из рис. 2, наибольшим забросом скольжения при КЗ в различных точках системы электроснабжения обладают потребители вторых секций РУ ТГ-4...7, так как эти секции имеют большую загруженность и наименьшую удаленность от генераторов и от точек КЗ из-за меньшей индуктивности реакторов по сравнению с первыми секциями шин тех же РУ. Поэтому одним из средств снижения чувствительности механизмов к внешним возмущениям является изменение проводимости сетей.

## Заключение

Разработанная методика выявления слабых мест опробована в условиях более сложного объекта исследования с большим количеством связей в сетях генераторного напряжения. Показана применимость методики, позволяющая выявить слабые места многомашинной системы в условиях крупных промышленных предприятий.

Методика выявления сенсорных и слабых мест схемы дает возможность более точно отстроить уставки релейной и технологической защиты, установленных на станциях для более надежной работы основного и вспомогательного технологического оборудования как самой тепловой электростанции, так и цеховых потребителей промышленного предприятия, питающихся с шин генераторного напряжения.

## Литература

1. Kondrashova, Y.N. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability / Y.N. Kondrashova, O.V. Gazizova, A.V. Malafееv // *Procedia Engineering*. – 2015. – No. 128. – P. 759–763. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.100

2. Малафеев, А.В. Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при отделении от энергосистемы в результате короткого замыкания / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2008. – № 17 (117). – С. 72–74.

3. Удалов, С.Н. Исследование режимов работы ветроэнергетической установки на базе электромагнитной трансмиссии в составе автономной системы электроснабжения / С.Н. Удалов, А.А. Ачитаев, М.С. Юманов // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. – 2015. – № 5. – С. 32–35.

4. Исследование электромеханических переходных режимов при выходе на раздельную работу узла действующего промышленного предприятия / О.В. Газизова, Д.А. Мусин, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова // *Энергетические и электротехнические системы*. – 2015. – № 1. – С. 143–152.

5. Газизова, О.В. Определение предельных параметров режимов для обеспечения успешной ресинхронизации объектов распределенной генерации в условиях предприятия черной металлургии / О.В. Газизова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика»*. – 2016. – № 4. – С. 12–22. DOI: 10.14529/power160402

6. Анализ переходных режимов асинхронных двигателей при выходе электростанции на раздельную с энергосистемой работу / И.Е. Кружич

лина, О.В. Газизова, А.В. Малафеев, Е.А. Гринчак // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2012. – № 20. – С. 183–187.

7. Анализ переходных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий, имеющих в своем составе объекты малой энергетики / О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова, В.М. Тарасов // *Промышленная энергетика*. – 2010. – № 4. – С. 22–28.

8. Исследование динамической устойчивости в системе электроснабжения ОАО «ММК» для различных конфигураций распределительных сетей при коротких замыканиях на примере ТЭЦ ОАО «ММК» / В.А. Изумицев, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова и др. // *Оптимизация режимов работы электротехнических систем*. – 2008. – № 1. – С. 51–56.

9. Xiufeng Shi. Research on Measures to Improve Stability of the Power System / Xiufeng Shi // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – No. 742. – P. 648–652. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.742.648

10. Исследование влияния ввода в работу перспективной воздушной линии на режимы промышленного энергетического узла / Ю.Н. Кондрашова, О.В. Газизова, И.М. Гладышева, И.М. Галлиулин // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2014. – № 4-2 (23). – С. 35–37.

11. Малафеев, А.В. Анализ статической устойчивости генераторов / А.В. Малафеев, О.В. Газизова, А.В. Кочкина, Е.А. Гринчак // *Главный энергетик*. – 2013. – № 7. – С. 17–25.

12. Caiqin, S. Analyzing and simulating dynamic stability of large marine power station systems / S. Caiqin, R. Guang, S. Chengjun // *2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation (Chongqing, 25–27 June 2008)*. – Chongqing, 2008. – P. 122–128. DOI: 10.1109/wcica.2008.4594252

13. Fei Ding. Dynamic modeling and stability analysis of grid-connected and autonomous distributed generation system / Fei Ding, Kenneth A. Loparo // *2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. – Washington, 2015. – P. 58–66. DOI: 10.1109/isgt.2015.7131896

14. Расчет динамических характеристик синхронных и асинхронных двигателей промышленных предприятий с целью анализа устойчивости систем электроснабжения / В.А. Изумицев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2006. – № 2. – С. 71–75.

15. Оценка эффективности релейной защиты в сетях 110–220 кВ сложных систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / В.А. Изумицев, Б.И. Заславец, Н.А. Николаев и др. – Магнитогорск: Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2011. – 141 с.

16. Harikrishna, D. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator / D. Harikrishna, N.V. Srikanth // *TELKOMNIKA*. – 2012. – No. 10. – P. 9–16.

17. Boudour, M. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique / M. Boudour, A. Hellal // *The Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2015. – No. 30. – P. 81–94. DOI: 10.1109/iecon.2003.1280077

18. Оценка регулирующего эффекта выпрямительной нагрузки для определения параметров установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.А. Николаев, О.В. Буланова, А.В. Малафеев и др. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2011. – № 4. – С. 115–118.

19. Methodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems / A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin, S.A. Evdokimov et al. // *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. – 2014. – P. 14–21. DOI: 10.1109/meacs.2014.6986866

20. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем / О.Н. Войтов, Н.И. Воропай, А.З. Гамм и др. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 256 с.

21. Науменко, В.Д. Определение опасного по условиям устойчивости сечения энергосистемы // *Автоматическое управление и противоаварийная автоматика в крупных энергообъединениях*. – 1987. – С. 42–45.

22. Yuang, G. The role of the weak cutset in stability monitoring / G. Yuang, J. Zaborszky // *IFAC Symp. on Power Synt. and Power Plant Control*. – 1989. – P. 103–107.

23. Малафеев, А.В. Анализ устойчивости двигателей собственных нужд электростанций ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» / А.В. Малафеев, А.С. Долганова, О.В. Газизова // *Главный энергетик*. – 2012. – № 10. – С. 40–46.

24. Малафеев, А.В. Разработка уточненной методики расчета моментно-скоростной характеристики питательного насоса тепловой электростанции в задаче анализа устойчивости собственных нужд / А.В. Малафеев, М.А. Тремасов // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2014. – № 3. – С. 58–63.

25. Malafeev, A.V. Method for Calculating Torque-Rate Characteristics of Feed Pump in Pumping, Turbining and Return Flow Mode / A.V. Malafeev, M.A. Tremasov // *2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. – 2018. – P. 224–230. DOI: 10.1109/icieam.2018.8728815

26. Малафеев, А.В. Анализ устойчивости двигателей собственных нужд тепловых электростанций с учетом характеристик приводных механизмов / А.В. Малафеев, М.А. Тремасов // *Элек-*

*тротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 4 (33). – С. 6–13.*

*27. Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 10.0: свидетельство об офи-*

*циальной регистрации программы для ЭВМ № 2019610251 / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, Е.А. Панова и др. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.01.2019.*

**Тремасов Максим Александрович**, аспирант, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова; tremasov.ma@gmail.com.

**Малафеев Алексей Вячеславович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова; malapheev\_av@mail.ru.

*Поступила в редакцию 9 октября 2019 г.*

---

DOI: 10.14529/power190408

## SYSTEM SENSOR ELEMENTS ANALYSIS AND IDENTIFICATION OF THE WEAK UNITS IN THE GENERATOR VOLTAGE SYSTEM

*M.A. Tremasov, tremasov.ma@gmail.com,*

*A.V. Malafeev, malapheev\_av@mail.ru*

*Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation*

Large industrial enterprises use own electrical and thermal energy sources in addition to external power systems. Therefore, ensuring the stable operation of both the auxiliary power plants supply mechanisms and the main technological equipment of an enterprise is an important task in the electric networks design and reconstruction. The reliability of the power supply system can be carried out in various ways, one of which is the identification and analysis of sensory (sensitive) circuit elements in order to further eliminate weak units. Thus, the paper considers a complex generator voltage network of an industrial enterprise that is connected to the system through high and extra high voltage substations. This network features thermal power plants with auxiliary and high-voltage industrial consumers of the enterprise and pumping stations. A series of electromechanical transients calculations was performed in the simulation of short circuits in the network using KATRAN 10.0 software package to identify the sensory elements of the circuit. Based on the results of the calculation, the stability of synchronous and asynchronous motors is estimated by determining the level of their operational parameters deviation. Based on the calculation results, it is concluded that the power plant mechanisms of auxiliary needs have the highest sensitivity, and the maximum deviation of the mode parameters is achieved during short circuits at high voltage levels. Analyzing the sensor elements of the system allows for the higher reliability of the industrial enterprise power supply system with strong disturbances in the network.

*Keywords: electric power plants, auxiliary needs, operating characteristics, dynamical stability, self-starting of motor, short circuits, sensor elements.*

### References

1. Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malapheev A.V. Increasing the Efficiency of Power Resource Management as a Solution of Issues of the Power Supply System Stability. *Procedia Engineering*, 2015, no. 128, pp. 759–763. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.100
2. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. [Research of Dynamical Stability of Industrial Power Systems with Own Power Stations at Separation From the Electric System in the Result of Short-Circuit Failure]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2008, no. 17 (117), pp. 72–74. (in Russ.)
3. Udalov S.N., Achitaev A.A., Yumanov M.S. [Research of Operation Modes of Wind Power Installation on the Basis of Electromagnetic Transmission as a Part of Autonomous System of Electric Power Supply]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'* [Electro. Electrical Engineering, Power Industry, Electrotechnical Industry], 2015, no. 5, pp. 32–35. (in Russ.)

4. Gazizova O.V., Musin D.A., Malafeev A.V., Kondrashova Yu.N. [Study on Electromechanical Transient Modes to Separate Work Site Acting Industrial Works]. *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy* [Energy And Electrotechnical Systems], 2015, no. 1, pp. 143–152. (in Russ.)
5. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Yu.N. Determination of Limit Mode Parameters to Ensure Successful Resynchronization of Distributed Generation Units at Iron and Steel Works. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 12–22. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160402
6. Kruzhilina I.E., Gazizova O.V., Malafeev A.V., Grinchak E.A. [Analysis of Transition Modes of Asynchronous Engines during the Electric Power Station on the Separated Work with Energy System]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2012, no. 20, pp. 183–187. (in Russ.)
7. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Rotanova Yu.N., Tarasov V.M. [Analysis of Transitional Modes of Electrical Supply Systems of Industrial Enterprises Having in Their Composition the Objects of Small Energy]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy], 2010, no. 4, pp. 22–28. (in Russ.)
8. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Rotanova YU.N., Ryazanova M.V. [Study of Dynamic Stability in the Power Supply system of LLC MMK for Various Configurations of Distribution Networks during Short Circuits using the Example of a Thermal Power Plant of LLC MMK]. *Optimizaciya rezhimov raboty elektrotekhnicheskikh sistem* [Optimization of Operating Modes of Electrical Systems], 2008, no. 1, pp. 51–56. (in Russ.)
9. Xiufeng, Shi. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, no. 742, pp. 648–652. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.742.648
10. Kondrashova Yu.N., Gazizova O.V., Gladysheva I.M., Galliulin I.M. [Research of Influence of Implementation of the Perspective Air-Line on Modes of the Industrial Energetic Hub]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2014, no. 4-2 (23), pp. 35–37. (in Russ.)
11. Malafeev A.V., Gazizova O.V., Kochkina A.V., Grinchak E.A. [Generator Static Stability Analysis]. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2013, no. 7, pp. 17–25. (in Russ.)
12. Caiqin S., Guang R., Chengjun S. Analyzing and Simulating Dynamic Stability of Large Marine Power Station Systems. *2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Chongqing, 25–27 June 2008, pp. 122–128. DOI: 10.1109/wcica.2008.4594252
13. Fei Ding, Kenneth A. Loparo. Dynamic Modeling and Stability Analysis of Grid-Connected and Autonomous Distributed Generation System. *2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, Washington, 18–20 Feb. 2015, pp. 58–66. DOI: 10.1109/isgt.2015.7131896
14. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova YU.N. [Calculation of Dynamic Characteristics of Synchronous and Asynchronous Motors of Industrial Enterprises in Order to Analyze the Stability of Power Supply Systems]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Reporter of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2006, no. 2, pp. 71–75. (in Russ.)
15. Igumenshchev V.A., Zaslavec B.I., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Kondrashova Yu.N., Panova E.A. [Evaluating the Effectiveness of Relaying Networks in Complex Systems of 110–220 kV Power Supply of Industrial Enterprises with their Own Power Plants], Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011. 141 p. (in Russ.)
16. Harikrishna D. Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator. *TELKOMNIKA*, 2012, no. 10, pp. 9–16.
17. Boudour M., Hellal A. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, no. 30, pp. 81–94. DOI: 10.1109/iecon.2003.1280077
18. Nikolaev N.A., Bulanova O.V., Malafeev A.V., Kondrashova Yu.N., Tarasov V.M. [Evaluation of the Regulating Effect of Remote Load for Determining the Parameters of Installed Modes of Electrical Supply Systems of Industrial Enterprises]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Educational institutions. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 115–118. (in Russ.)
19. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. Methodology of Calculation of the Reliability Indexes and Life Time of the Electric and Mechanical Systems. *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*, Tomsk, 16–18 Oct. 2014, pp. 14–21. DOI: 10.1109/meacs.2014.6986866
20. Voytov O.N., Voropay N.I., Gamm A.Z. et al. [Analysis of Irregularities in Electric Power Systems]. Novosibirsk, Nauka. Sibirskaya izdatelskaya firma RAN Publ., 1999. 256 p. (in Russ.)
21. Naumenko V.D. [Determination of Dangerous to Stability Conditions of Power System Sections]. *Avtomaticheskoe upravlenie i protivoavarijnaya avtomatika v krupnykh energoob"edineniyah* [Automatic Control and Emergency Control in Large Energy Associations], 1987, pp. 42–45. (in Russ.)
22. Yuang G., Zaborszky J. The role of the weak cutset in stability monitoring, *IFAC Symp. on Power Synt. and Power Plant Control*, Tallinn, 10–12 August 1989, pp. 103–107.

23. Malafeev A.V., Dolganova A.S., Gazizova O.V. [Stability Analysis of Motors of Auxiliary Power Plants at JSC “ММК”]. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2012, no. 10, pp. 40–46. (in Russ.)

24. Malafeev A.V., Tremasov M.A. [Development of Updated Methodology for Calculating Torque-Speed Characteristics of Thermal Power Plant Feed Pump in The Problem of Auxiliary Power Stability Analysis]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2014, no. 3, pp. 58–63. (in Russ.)

25. Malafeev A.V., Tremasov M.A. Method for Calculating Torque-Rate Characteristics of Feed Pump in Pumping, Turbining and Return Flow Mode. *2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Moscow, 15–18 May 2018, pp. 224–230. DOI: 10.1109/icieam.2018.8728815

26. Malafeev A.V., Tremasov M.A. [Analytical Determination of Torque-Speed Characteristics of the Blower Fan of the Thermal Power Plant]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 4 (33), pp. 6–13. (in Russ.)

27. Igmenshchev V.A., Malafeev A.V., Panova E.A., Varganova A.V., Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Zinov'ev V.V., Yuldasheva A.I., Krubcova A.A., Anisimova N.A., Nasibullin A.T., Tremasov M.A., Shcherbakova V.S., Bogush V.K. *Kompleks avtomatizirovannogo rezhimnogo analiza KATRAN 10.0* [Complex Automated Mode Analysis KATRAN 10.0]. Certificate of official registration of computer program no. 2019610251. Registered in computer program register 09.01.2019.

*Received 9 October 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Тремасов, М.А. Анализ сенсорных элементов схемы и выявление слабых мест в сетях генераторного напряжения / М.А. Тремасов, А.В. Малафеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 70–78. DOI: 10.14529/power190408

### FOR CITATION

Tremasov M.A., Malafeev A.V. System Sensor Elements Analysis and Identification of the Weak Units in the Generator Voltage System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 70–78. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190408