

# МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ ПО РЕЖИМНЫМ ПАРАМЕТРАМ И ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

*М.А. Дзюба, В.В. Тарасенко, А.В. Коржов*

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Предлагается новый подход при обработке результатов активного эксперимента по определению статических характеристик комплексной нагрузки (СХН) по напряжению в узле энергосистемы. Проблема заключается в том, что во время проведения активного эксперимента, как правило, изменяется состав потребителей и искомая СХН, при этом количество возможных ступеней регулирования напряжения ограничивается режимными параметрами и факторами электробезопасности эксперимента, что значительно осложняет процедуру идентификации реальной СХН. В работе рассматривается возможность применения методов оптимизации при решении указанной проблемы. Для проверки предложенного метода проведен эксперимент на лабораторной установке и на его примере показана работоспособность модифицированного метода определения СХН.

*Ключевые слова:* статические характеристики нагрузки, моделирование нагрузки, активный эксперимент, методы оптимизации.

## **Введение**

Математическое моделирование режимов электроэнергетических систем для определения их устойчивости и пропускной способности является основным инструментом при ведении оперативно-диспетчерского управления. Современные программные средства расчета режимов позволяют учитывать нагрузки при моделировании не просто постоянными мощностями или сопротивлениями, а их статическими характеристиками.

Для корректного учета статических характеристик нагрузки в узлах энергосистемы лучшим способом получения объективной информации о них считаются активные эксперименты.

Существуют разработанные методики идентификации СХН на основе активного эксперимента. Каждая из них обладает преимуществами и недостатками. В настоящей работе предлагается скорректировать известные методики для повышения точности определения параметров СХН в условиях ограничений, накладываемых на активный эксперимент, обусловленных факторами надежности и электробезопасности.

## **Актуальность и значимость вопроса**

Последние несколько лет системным оператором единой энергосистемы России проводятся работы по уточнению статических характеристик нагрузок в различных узлах энергосистемы. Однако при выполнении таких работ отсутствует нормативно-техническая документация, четко регламентирующая алгоритм проведения эксперимента и порядок обработки его результатов. С одной стороны, это связано с тем, что для узлов с городской нагрузкой требуется одна методика, а,

например, для металлургического завода – другая. С другой стороны, существует большое количество подходов к этому вопросу.

## **Состояние вопроса**

Современные публикации по данной теме [1–14] свидетельствуют, что лучше всего СХН комплексной нагрузки получать путём проведения активного эксперимента. Состав потребителей или режимов работы их установок в узле энергосистемы может меняться во время проведения замеров. Однако абсолютно достоверно определить это, проводя измерения только в одной точке электрической сети, затруднительно. Кроме того, даже если удалось решить эту проблему, аппроксимация СХН полиномом второго порядка с помощью метода наименьших квадратов может дать результат, сильно отличающийся от реального, особенно если диапазон изменения напряжения при измерениях был небольшой.

Для решения данной проблемы может быть использован подход [1, 2], основанный на допущении того, что за время эксперимента СХН отдельных потребителей, как и их состав, не изменился. Имеющее же место фактическое изменение этих величин можно считать помехами. Тогда сами СХН можно определить с помощью метода наименьших квадратов.

В публикациях [3–5, 12–14] указывается, что даже при наличии достоверной информации о неизменности состава потребителей во время эксперимента нет гарантии получения однозначно трактуемых результатов. Связано это с резкопеременным характером нагрузки некоторых промышленных электроприемников. Для того чтобы

отсечь нерегулярную составляющую изменения мощности, предложена специальная методика. Её основная идея заключается в том, чтобы брать в качестве расчётных значений пары измерений непосредственно до и после управляющего воздействия по изменению напряжения. Так как эти измерения очень близки друг к другу по времени, то вероятность изменения за это время статической характеристики минимальна.

Алгоритм, основанный на выделении участков постоянства СХН, приводится и в аналогичных исследованиях [6–8]. Для этого из массива полученных данных отфильтровываются все незначимые изменения.

В публикациях [9–11] добавляется, что при проведении активного эксперимента напряжение должно изменяться ступенями с шагом, значительно большим погрешности измерений, и с задержкой на каждой ступени на время затухания переходного процесса. Чтобы снизить вероятность изменения СХН за время эксперимента, в расчёт необходимо принимать только небольшие (5 секунд) интервалы измерений на каждой из ступеней регулирования напряжения. Интервал берётся непосредственно до момента изменения напряжения и после затухания переходного процесса. Суть методики заключается в определении значений базисной мощности для каждого интервала измерений таким образом, чтобы все экспериментальные данные в относительных единицах приводились к единой СХН.

#### Постановка задачи

Таким образом, авторами ставится задача – усовершенствовать существующие методики идентификации результатов активного эксперимента с учётом величины практически достижимого интервала изменения напряжения. При этом должно достигаться равенство полученных коэффициентов полинома единице, а форма получаемой кривой должна соответствовать действительному её виду, получаемому при анализе данных более широкого диапазона.

#### Теоретическая часть

Методика идентификации СХН, изложенная в [3], является достаточно разработанной и совершенной. Однако в условиях ограничений, накладываемых на эксперимент, по возможным границам регулирования напряжения возникают вопросы получения в результате итерационных вычислений коэффициентов полинома, по сумме равных единице. А также в случае изменения фактической СХН в процессе проведения активного эксперимента расчета базисной мощности для выбранных измерительных данных. Все эти сложности объясняются тем, что применяемый метод наименьших квадратов является математическим аппаратом, не учитывающим ряд факто-

ров, воздействующих на полученные в результате эксперимента данные. Поэтому предлагается модифицировать методику поиска коэффициентов полинома, изложенную в [3].

В качестве набора измерительных данных по результатам активного эксперимента принимаются значения  $U_i, P_i, Q_i$ , где  $i$  – порядковый номер набора данных.

После выделения пар измерительных данных сразу до и после переключения регулятора под нагрузкой (РПН) вводится следующая нумерация пар данных. Номер первого значения в паре данных обозначается  $i_1$ , а номер второго значения в паре –  $i_2$ . Измерительные данные берутся или на интервале времени измерений при снижении напряжения или на интервале времени только подъёма напряжения. В этом случае разность значений напряжения  $U_{i1} - U_{i2}$  для всех пар данных будет или только положительной, или только отрицательной. Номинальным напряжением считается напряжение, поддерживаемое в точке оценки СХН в нормальном режиме. Это значение остаётся неизменным при дальнейших вычислениях. В массиве данных находится пара, в которой одно из пары значений напряжения равно или наиболее близко к принятому номинальному значению.

Первоначальное номинальное значение мощности принимается равным выбранному из набора измерительных данных и соответствующим принятому номинальному напряжению. Для той пары измерительных данных, в которой напряжение равно или близко к номинальному, базисная мощность принимается равной номинальной мощности. Затем находятся базисные мощности для каждой пары измерительных данных. Базисная мощность для пар данных, соответствующих напряжениям выше номинального, определяется по формуле

$$P_{\text{баз}i} = \frac{P_{i1} \cdot P_{\text{баз}i-1}}{P_{i2}} \quad (1)$$

Базисную мощность для пар данных, соответствующих напряжениям ниже номинального, определяют по другой формуле

$$P_{\text{баз}i} = \frac{P_{i2} \cdot P_{\text{баз}i+1}}{P_{i1}} \quad (2)$$

После определения базисных мощностей и номинального напряжения все данные переводятся в относительные единицы. Далее составляется система уравнений, например, для активной мощности:

$$\begin{bmatrix} P_{*11} \\ P_{*12} \\ P_{*i1} \\ \vdots \\ P_{*N2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & U_{*11} & U_{*11}^2 \\ 1 & U_{*12} & U_{*12}^2 \\ 1 & U_{*i1} & U_{*i1}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & U_{*N2} & U_{*N2}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $N$  – количество пар данных.

Система уравнений (3) является переопределённой. Для ее решения можно применить метод наименьших квадратов. Однако в этом случае

придется прибегнуть к итерационным вычислениям, как это описано в [3]. Поэтому предложено решать оптимизационную задачу, опираясь на принципы метода наименьших квадратов, но с дополнительными условиями. Система уравнений (3) преобразовывается в целевую функцию вида

$$\sum_{i=1}^N (P_{*i} - (a_0 + a_1 U_{*i} + a_2 U_{*i}^2))^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

При нахождении минимума функции (4) принимаются следующие условия:

$$\sum_{i=0}^2 a_i = 1; \quad (5)$$

$$a_0 \geq 0; a_1 \leq 0; a_2 \geq 0.$$

В процессе поиска минимума функции (4) переменными принимаются не только коэффициенты полинома  $a_0$ ,  $a_1$ , и  $a_2$ , но и принятое первоначальное значение номинальной мощности. Поэтому при решении задачи будут изменяться и значения  $P_{*i}$ . Ограничения в виде неравенств в (5) справедливы для поиска коэффициентов полинома СХН в узле с комплексной нагрузкой, так как опыт многолетних исследований показывает, что характер зависимости мощности от напряжения имеет именно такой вид и обусловлен совокупностью СХН отдельных электроприемников. Функция (4) имеет один минимум, поэтому для решения оптимизационной задачи можно применить градиентные методы оптимизации, пригодные для решения нелинейных оптимизационных задач, что позволит получить достаточно точный результат за минимальное время.

### Практическая часть

Для проверки приведенной методики были выполнены экспериментальные исследования на лабораторной установке. СХН с постоянным сопротивлением описывается известным полиномом с коэффициентами

$$a_0 = 0, a_1 = 0, a_2 = 1,$$

поэтому в качестве нагрузки использовались регулируемые реостаты номинальным сопротивлением 200 Ом.

Для проведения эксперимента была собрана трехфазная схема на лабораторной установке. Для

изменения напряжения использовался трехфазный регулируемый источник питания. Схема замещения экспериментальной установки приведена на рис. 1. Фиксация значений напряжения и мощности производилась измерительным прибором «Энерготестер».

Основная сложность при идентификации коэффициентов полинома СХН по результатам экспериментальных данных заключается в том, что состав потребителей меняется во время эксперимента. Для имитации изменения состава потребителей или режима их работы в процессе изменения напряжения производилось регулирование сопротивления реостатов таким образом, чтобы во время изменения напряжения сопротивление нагрузки было постоянным, а между изменениями напряжения сопротивление увеличивалось. Регулирование напряжения осуществлялось достаточно большими интервалами изменения. На трехсекундных интервалах измерялись междуфазные напряжения и суммарная активная мощность. Графики изменения во времени среднего значения трех междуфазных напряжений и суммарной активной мощности приведены на рис. 2.

В соответствии с методикой выбраны пары значений на границах изменения напряжения (табл. 1). В качестве номинального напряжения принято напряжение 380 В. Оно находится в интервале между значениями напряжения четвертой пары из табл. 1. Предварительное значение номинальной мощности было принято равным 400 Вт. Большой точности в определении первоначального значения номинальной мощности не требуется, так как в дальнейшем оптимизационный алгоритм подберет наиболее подходящее значение. По формулам (1) и (2) для каждой пары значений активной мощности была вычислена базисная мощность. Начальные расчетные значения базисных мощностей также представлены в табл. 1. Все значения напряжения и активной мощности переведены в относительные единицы (см. табл. 1).

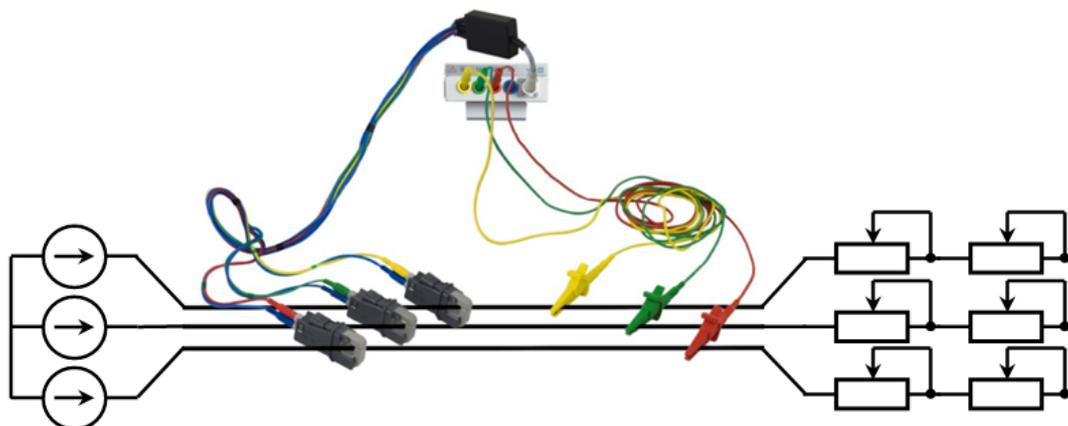


Рис. 1. Схема замещения экспериментальной установки и схема подключения измерительного прибора

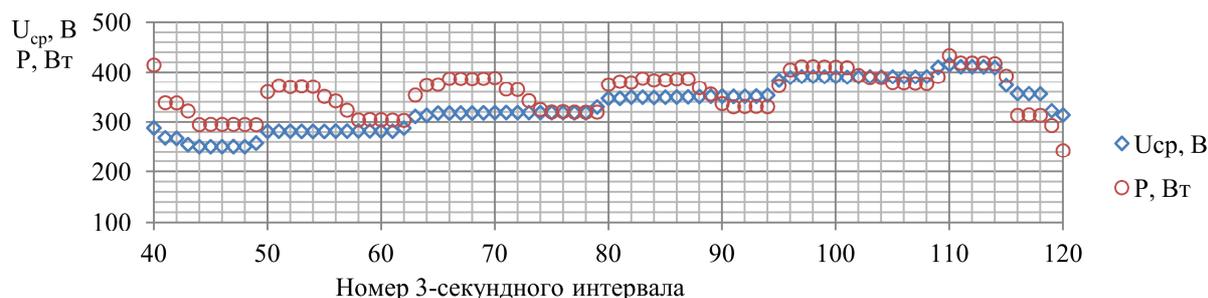


Рис. 2. Графики изменения во времени напряжения и активной мощности

Таблица 1

Номер пары	$U$ , В	$P$ , Вт	$P_{\text{баз}}$ , Вт	$U$ , о.е.	$P$ , о.е.
1	258,0	294,4	633,3	0,68	0,46
	281,3	360,4		0,74	0,57
2	287,7	303,0	532,6	0,76	0,57
	313,0	374,5		0,82	0,70
3	329,8	319,5	454,4	0,87	0,70
	347,0	375,1		0,91	0,83
4	353,0	330,2	400,0	0,93	0,83
	389,2	405,1		1,02	1,01
5	391,2	376,4	371,6	1,03	1,01
	415,9	433,6		1,09	1,17

Таблица 2

Номер пары	$U$ , В	$P$ , Вт	$P_{\text{баз}}$ , Вт	$U$ , о.е.	$P$ , о.е.
1	258,0	294,4	612,6	0,68	0,49
	281,3	360,4		0,74	0,57
2	287,7	303,0	515,1	0,76	0,59
	313,0	374,5		0,82	0,69
3	329,8	319,5	439,5	0,87	0,76
	347,0	375,1		0,91	0,84
4	353,0	330,2	386,9	0,93	0,87
	389,2	405,1		1,02	1,05
5	391,2	376,4	359,5	1,03	1,06
	415,9	433,6		1,09	1,20

После решения оптимизационной задачи с целевой функцией по уравнению (4) и описанными в методике ограничениями (5) получены результаты, приведенные в табл. 2.

При этом коэффициенты полинома получились следующие:

$$a_0 = 0,24, a_1 = -0,45, a_2 = 1,21.$$

По расчетным и теоретическим значениям коэффициентов полинома построены соответствующие кривые, приведенные на рис. 3. Как видно из рисунка, есть некоторое расхождение между экспериментальной и теоретической характеристиками, что можно объяснить некоторой несимметричностью активной нагрузки, вызванной неодинаковым изменением сопротивления каждого реостата, а также погрешностью измерений.

Однако при проведении активного эксперимента в условиях эксплуатации получить измерительные данные в таком широком диапазоне на-

пряжений не представляется возможным в виду наступления аварийных отключений при низких напряжениях. Поэтому необходимо оценить адекватность предложенного метода на узком диапазоне напряжений. Для дальнейших расчетов были выбраны только данные третьей и четвертой пар, выделенные в табл. 2 жирной рамкой. Эти данные соответствуют возможному диапазону изменения напряжения при снятии СХН на действующем объекте. Результат расчета по приведенной методике представлен в табл. 3.

Получившиеся коэффициенты полинома:

$$a_0 = 0,00, a_1 = -0,09, a_2 = 1,09.$$

Также видно, что номинальная мощность изменилась на значение 387,4 Вт.

В то же время коэффициенты полинома СХН, полученной по методу наименьших квадратов, для данных табл. 3 равны:

$$a_0 = -3,43, a_1 = 7,14, a_2 = -2,71.$$

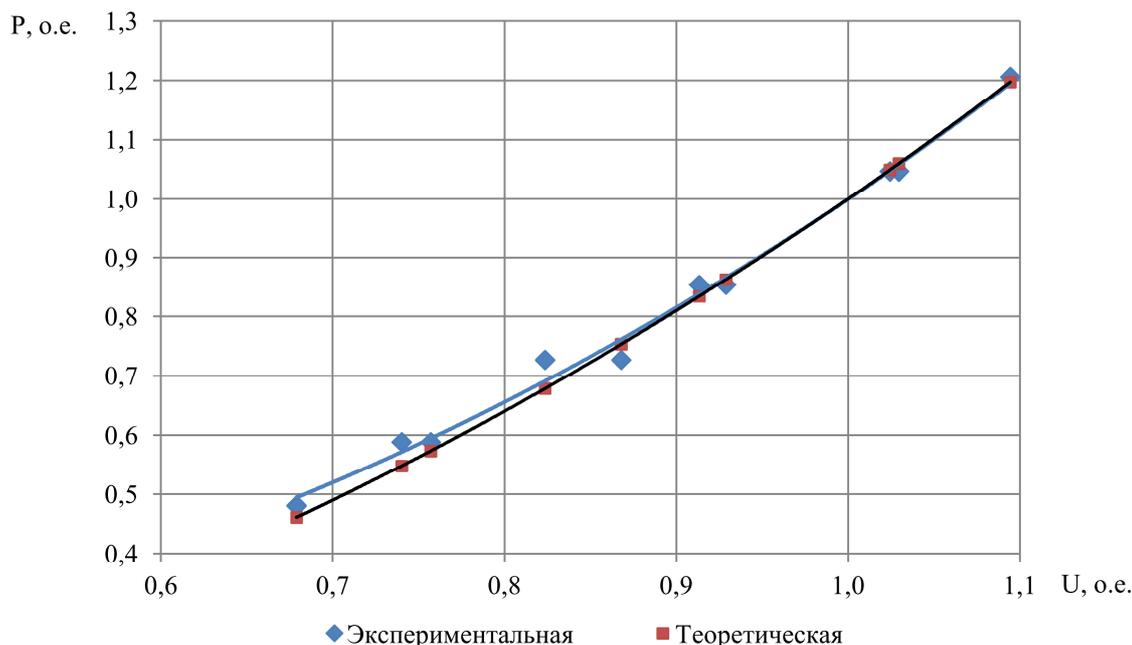


Рис. 3. Экспериментальная и теоретическая СХН по напряжению

Таблица 3

Номер пары	$U$ , В	$P$ , Вт	$P_{\text{баз}}$ , Вт	$U$ , о.е.	$P$ , о.е.
3	329,8	319,5	440,1	0,87	0,74
	347,0	375,1		0,91	0,83
4	353,0	330,2	387,4	0,93	0,86
	389,2	405,1		1,02	1,05

Таблица 4

$U$ , о.е.	Абсолютная разность теоретических значений и значений по предлагаемой методике	Абсолютная разность теоретических значений и значений по методу наименьших квадратов
0,85	0,011	0,041
0,90	0,008	0,009
0,95	0,004	-0,005
1,00	0,000	0,000
1,05	-0,005	0,023
1,10	-0,010	0,065

В случае построения СХН, рассчитанной по методу наименьших квадратов, отклонение вниз как от теоретических, так и от практических результатов будет существенным. По полученным с помощью предлагаемого метода и метода наименьших квадратов коэффициентам полиномов определены значения мощности при соответствующих значениях напряжения. В табл. 4 представлены результаты расчета абсолютных отклонений значений мощности, в СХН, построенных по расчетным коэффициентам, от теоретической СХН.

Из табл. 4 видно, что при значениях напряжения 0,85 и 1,10 отклонение расчетных значений мощности, полученных по методу наименьших квадратов, от теоретических становится значительно больше, чем отклонение этих же значений,

полученных по предлагаемой методике. Кроме того, при значениях напряжения 1,05 и 1,10 отклонения значений по методу наименьших квадратов положительные, значит значения мощности, полученные по этому методу, будут меньше фактических. Чем выше напряжение, тем больше будет эта разница. Такая погрешность приведет к ошибкам моделирования режимов энергосистем на участках СХН, не попавших в активный эксперимент. В итоге на этих участках возрастает риск перегрузки сечений линий.

### Заключение

Решение проблемы идентификации данных в процессе обработки результатов активного эксперимента при построении СХН возможно путём применения методов оптимизации вместо метода

наименьших квадратов. Такой подход позволяет в виде ограничений задать ряд дополнительных характеристик кривой (равенство всех коэффициентов единице, их положительные либо отрицательные значения). В результате удаётся получить единственный набор коэффициентов полинома, достаточно точно моделирующий реальный вид СХН при ограниченном факторами режима и электробезопасности диапазоне регулирования напряжения в активном эксперименте.

Результаты эксперимента, проведённого на лабораторной установке, подтверждают сделанные предположения о необходимости введения ограничений в оптимизационную задачу поиска коэффициентов полинома.

### Литература

1. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой / С.В. Балдов, О.А. Бушуева, Д.Н. Кормилицын и др. // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 6. – С. 22–30.
2. Экспериментальные исследования и получение статических характеристик нагрузки по напряжению узла электрической сети с комплексной нагрузкой / О.А. Бушуева, А.И. Кулешов, А.Ю. Мурзин и др. // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XVIII Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф. – 2015. – С. 163–166.
3. Хрущёв, Ю.В. Методика идентификации статических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента / Ю.В. Хрущёв, А.В. Панкратов, Н.Л. Бацева // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. – 2014. – Т. 325, № 4. – С. 164–175.
4. Хорун, А.Б. Алгоритм получения статических характеристик нагрузки промышленного предприятия аналитическим методом / А.Б. Хорун // Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодёжи»: сб. науч. докл. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». 2015. – Т. 1. – С. 245–248.
5. Панкратов, А.В. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем / А.В. Панкратов, В.И. Полищук, Н.Л. Бацева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 11–20. DOI: 10.14529/power150102
6. Прогнозирование реакции нагрузки для решения задачи идентификации статических характеристик по напряжению / С.И. Перминов, А.А. Суворов, А.С. Тавлинцев и др. // Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодёжи»: сб. науч. докл. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – 2015. – Т. 1. – С. 259–264.
7. Тавлинцев, А.С. Статистически равновесные состояния нагрузки в задаче идентификации статических характеристик нагрузки / А.С. Тавлинцев, А.А. Суворов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 23–28. DOI: 10.14529/power170203
8. Определение статической характеристики крупных узлов нагрузки / А.В. Паздерин, А.А. Суворов, А.С. Тавлинцев и др. // Научное обозрение. – 2013. – № 7. – С. 70–77.
9. Определение статических характеристик мощности нагрузок узлов сети на основе активного эксперимента / В.Ф. Кравченко, В.И. Нагай, И.Ф. Бураков и др. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2015. – № 1. – С. 54–59. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-1-54-59
10. Способы обработки данных активного эксперимента при определении статических характеристик мощности нагрузок узлов сети по напряжению / В.И. Нагай, В.Ф. Кравченко, И.Ф. Бураков и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 6. – С. 67–71. DOI: 10.17213/0136-3360-2014-6-67-71
11. Определение статических характеристик нагрузки узлов сети с приведением данных активного эксперимента к одному уровню номинальной мощности нагрузки / В.И. Нагай, В.Ф. Кравченко, И.Ф. Бураков и др. // Кибернетика энергетических систем. Сборник материалов XXXVII сессии семинара по тематике «Электроснабжение». – 2016. – С. 107–112.
12. Готман, В.И. Обобщённые статические характеристики электроэнергетических подсистем и их коэффициенты крутизны / В.И. Готман, Г.З. Маркман // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – Т. 311, № 4. – С. 131–134.
13. Готман, В.И. Единый алгоритм оценки статической устойчивости и расчёт установившихся режимов энергосистем / В.И. Готман // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – Т. 311, № 4. – С. 134–138.
14. Готман, В.И. Эквивалентирование энергосистем для оценки статической устойчивости / В.И. Готман, А.В. Глазачёв // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 152–155.

**Дзюба Михаил Александрович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; dziubama@susu.ru.

**Тарасенко Виктор Виторович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; tarasenkovv@susu.ru.

**Коржов Антон Вениаминович**, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; korzhovav@susu.ru.

Поступила в редакцию 2 апреля 2018 г.

---

DOI: 10.14529/power180204

### METHOD FOR DETERMINING OF VOLTAGE STEADY-STATE LOAD CHARACTERISTICS WITH SUBJECT TO THE LIMITATION ON SENSITIVE PARAMETERS AND ELECTRICAL SAFETY OF ACTIVE EXPERIMENT

**M.A. Dziuba**, dziubama@susu.ru,  
**V.V. Tarasenko**, tarasenkovv@susu.ru,  
**A.V. Korzhov**, korzhovav@susu.ru

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

This article proposes a new approach to the processing of the active experiment results to determine the voltage steady-state load characteristics (SLC) with diverse loads in the node of the power system. The problem is that during the active experiment the composition of consumers and the desired SLC change, while the number of possible voltage control stages is limited by the operating parameters and electrical safety factors during the experiment, which significantly complicates the identification procedure of the real SLC. The paper considers the possibility of using optimization methods in solving this problem. To test the proposed method, an experiment was carried out at the laboratory installation and the efficiency of the modified method for determining the SLC is shown by its example.

*Keywords: steady-state load characteristics, load simulation, active experiment, optimization methods.*

#### References

1. Baldov S.V., Bushueva O.A., Kormilitsyn D.N., Kuleshov A.I., Meshkova Yu.S., Murzin A.Yu., Shulpin A.A. [Determination of Voltage Steady-state Load Characteristics in Electric Networks with Diverse Loads]. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2014, vol. 6, pp. 22–30. (in Russ.)
2. Bushueva O.A., Kuleshov A.I., Murzin A.Yu. [Experimental Researches and Reception of Load Static Characteristics on a Voltage of the Electric Network Node with Complex Load]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii (XVIII Benardosovskie chteniya)* [The State and Prospects of the Development of Electrical and Thermal Technology (XVIII Benardos Readings)]. Ivanovo, 2015, pp. 163–166. (in Russ.)
3. Khrushchev Yu.V., Pankratov A.V., Batseva N.L. [The Technique for Identifying Load Static Characteristics Based on Experimental Data]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 164–175. (in Russ.)
4. Khorun A.B. [Algorithm for Calculation of Static Load Characteristics for the Industrial Enterprise by Analytical Approach]. *Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Elektroenergetika glazami molodezhi"* [All-Russian Scientific and Technical Conference "Electric Power through the Eyes of Youth"]. Ivanovo, 2015, vol. 1, pp. 245–248. (in Russ.)
5. Pankratov A.V., Polishchuk V.I., Batseva N.L. Measurement-Based Approach for Identification of Static Load Models of Electric Power Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 11–20. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150102
6. Perminov S.I., Suvorov A.A., Tavlintsev A.S. [Forecasting the Load Response for Solving the Problem of Identifying Static Voltage Characteristics]. *Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Elektroenergetika glazami molodezhi"* [All-Russian Scientific and Technical Conference "Electric Power through the Eyes of Youth"]. Ivanovo, 2015, vol. 1, pp. 259–264. (in Russ.)

7. Tavlintsev A.S., Suvorov A.A. Statistically Equilibrium States of Load in the Problem of Static Load Characteristics Identification. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 23–28. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170203

8. Pazderin A.V., Suvorov A.A., Tavlintsev A.S., Chusovitin P.V., Yudin A.V. [Determination of the Static Properties of Large Load Centers]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2013, vol. 7, pp. 70–77. (in Russ.)

9. Kravchenko V.F., Nagai V.I., Burakov I.F., Zoloyev B.P. [Determination of Static Characteristics of Power Loads of Network Nodes Based on the Active Experiment]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region, Ser. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Higher Educational Institutions, North-Caucasian Region, Ser. Technical Science], 2015, vol. 1, pp. 54–59. (in Russ.) DOI: 10.17213/0321-2653-2015-1-54-59

10. Nagai V.I., Kravchenko V.F., Burakov I.F., Zoloyev B.P. [Methods of Data Processing in the Active Experiment when Determining the Static Characteristics of the Power Loads of the Nodes in the Network Voltage]. *Scientific and Technical Journal. Russian Electromechanics*, 2014, no. 6, pp. 67–71. (in Russ.) DOI: 10.17213/0136-3360-2014-6-67-71

11. Nagay V.I., Kravchenko V.F., Burakov I.F., Zoloyev B.P., Kostinsky S.S. [Determination of Static Load Characteristics of Knots of Network with Bringing Data over of Active Experiment to One Level of Nominal Power of Loading]. *Kibernetika energeticheskikh sistem. Sbornik materialov XXXVII sessii seminara po tematike "Elektrosnabzhenie"* [Cybernetics of Energy Systems. Collection of Materials of the XXXVII Session of the Seminar on "Electricity Supply"]. Novocherkassk, 2016, pp. 107–112. (in Russ.)

12. Gotman V.I., Markman G.Z. [Generalized Static Characteristics of Electropower Subsystems and Their Steepness Coefficients]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 4, pp. 131–134. (in Russ.)

13. Gotman V.I. [Common Algorithm of Static Stability Estimation and Computation of the Established Modes of Power Supply Systems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 4, pp. 134–138. (in Russ.)

14. Gotman V.I., Glazachev A.V. [Equivalent Power Systems for Static Stability Assessment]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 152–155. (in Russ.)

Received 2 April 2018

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Дзюба, М.А. Метод определения статических характеристик нагрузки по напряжению с учетом ограничений по режимным параметрам и электробезопасности активного эксперимента / М.А. Дзюба, В.В. Тарасенко, А.В. Коржов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 28–35. DOI: 10.14529/power180204

#### FOR CITATION

Dziuba M.A., Tarasenko V.V., Korzhov A.V. Method for Determining of Voltage Steady-State Load Characteristics with Subject to the Limitation on Sensitive Parameters and Electrical Safety of Active Experiment. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 28–35. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180204