

ОПТИМАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Акад. НАН Азербайджана, докт. техн. наук, проф. ГАШИМОВ А. М.,
канд. техн. наук РАХМАНОВ Р. Н., инж. АХМЕДОВА С. Т.

*Институт физики НАН Азербайджана,
Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт энергетики,
ВР-Азербайджан*

В настоящее время в распределительных электрических сетях в целях уменьшения мощности и энергии потерь, а также поддержания напряжения в допустимых пределах широко используются источники реактивной мощности. Эффективность достижения этих целей зависит от места, размерности, типа и числа емкостей, устанавливаемых в сети. Для решения данной проблемы применяются метод нелинейной оптимизации [1–4], эвристический метод [5], а также методы комбинаторной оптимизации [6]. Хотя все эти методы имеют различные достоинства для решения задачи размещения источников реактивной мощности в сети, их эффективность зависит от качества используемой исходной информации.

В последние годы для оптимального размещения батарей конденсаторов разработаны методы искусственного интеллекта: нейронных сетей, нечеткой логики, генетического алгоритма [7–9]. Методы нечеткой логики и нейронных сетей [7, 8] обладают особенностью решать задачу оптимизации при наличии неопределенности и случайном характере исходных данных. Кроме того, метод нечеткой логики [8] приобретает определенные преимущества от включения в процесс оптимизации эвристических понятий и функций принадлежности.

Из существующих методов размещения конденсаторов только незначительная их часть может быть использована как при планировании, так и при эксплуатации систем электроснабжения. В работе предложена методика использования генетического алгоритма (ГА) для оптимального размещения конденсаторов. Предлагаемая методика может быть использована как для задач планирования, так и для оптимизации управления реактивной мощностью в условиях эксплуатации. Предлагаемый метод апробирован на распределительной сети, содержащей 16 узлов.

Формулирование и математическое описание задачи. Оптимальное размещение конденсаторов представляет собой задачу со многими переменными, включая число и стоимость батарей конденсаторов, места их размещения, величины напряжений в узлах электрической сети, потери мощности и энергии в ее элементах. С учетом того, что число конденсаторов представляет собой дискретную переменную, а ее стоимость обычно изменяется нелинейно от размерности батареи, задача выбора оптимальных мест для размещения конденсаторов представляет собой задачу комбинаторной оптимизации. При этом цель размещения состоит в минимизации

ции стоимости суммарных затрат на установку единичной мощности конденсатора и потери электроэнергии в электрической сети. В соответствии с данной целью функция, минимизирующая суммарные затраты, может быть представлена следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{N_y} (x_i C_{0i} + Q_{ci} C_{1i} + B_i C_{2i} T) + C_2 \sum_{l_{1,2,3}}^{N_l} T_l P_L^l \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где N_y – число узлов электрической сети, в которых предполагается установка батарей статических конденсаторов (БСК); x_i соответствует 0 или 1, т. е. отсутствию или наличию в узле батарей конденсаторов; C_{0i} – стоимость установки; C_{1i} – то же 1 квар установки БСК; Q_{ci} – мощность БСК, квар; B_i – число банок в БСК; C_{2i} – стоимость эксплуатации одной банки в течение года; T – планируемый период (годы) эксплуатации конденсаторов; C_2 – стоимость каждого кВт·ч потерь, дол./(кВт·ч); $l_{1,2,3}$ – уровень нагрузки, соответствует числу характерных значений нагрузки в течение года, т. е. число выбранных значений нагрузки между годовыми максимумом и минимумом; T_l – продолжительность действия уровня нагрузки l в течение года, ч; P_L^l – потери мощности в электрической сети при заданном уровне нагрузки l .

При поиске оптимальных мест размещения БСК используются ограничения в виде равенства потоков мощностей и неравенств, лимитирующих диапазон отклонений величины напряжений и коэффициенты мощности нагрузок в контролируемых узлах электрической сети. Эти ограничения могут быть представлены в следующем виде:

$$F(x, u) = 0; \quad (2)$$

$$U_{\min} \leq U \leq U_{\max}; \quad PF_{\min} \leq PF \leq PF_{\max}. \quad (3)$$

Методика оптимального размещения БСК. В общем случае методология оптимизации на основе генетического алгоритма известна и реализуется в четыре этапа:

- инициализация алгоритма;
- оценивание функции пригодности;
- селекция;
- генетические операторы перекрещивания (кроссовера) и мутации.

В предлагаемой методике в отличие от существующих подходов оптимального размещения батарей конденсаторов расчет суммарных потерь электроэнергии (вторая слагаемая в выражении) приводится с учетом изменчивости нагрузок узлов. С этой целью для каждого узла нагрузка задается различными значениями от его минимума до максимума, наблюдаемых в течение года. При этом для каждого уровня нагрузки предварительно определены интервалы их продолжительности T_l в течение года. Кроме того, в целевой функции (1) разделение затраты, связанной с установкой

и эксплуатацией конденсаторов, позволяет для каждого узла в отдельности оценить экономические показатели по составляющим затрат.

Инициализация имеет целью генерировать набор исходных решений, формирующих так называемую «начальную популяцию».

С помощью оператора мутации расширяется область разнообразия популяций, что позволяет уменьшить вероятность потери информации.

Формирование начальной популяции – совокупности параметров режима электрической сети (потоков мощности и потерь мощности в ветвях, напряжений в узлах) для различных сочетаний (размеров и количества банок) БСК, установленных в узлах нагрузки, является одним из важных этапов ГА. В хромосоме каждой популяции гены изображают узел электрической сети с наличием или отсутствием батареи конденсаторов. Отсутствие батареи конденсаторов в каком-либо узле кодируется в виде признака гена «0», а при включенном изображается числом батарей конденсаторов. Хромосома состояния узлов при включенных и отключенных конденсаторах представлена в табл. 1.

Таблица 1

Номер узла	1	2	3	4	...	$m - 2$	$m - 1$	m
Ген	3	0	2	4	...	3	1	2

Процедура алгоритма оптимизации в соответствии с (1)–(3) может быть представлена в виде последовательности следующих этапов:

1. Сбор исходных данных: размер популяции, коэффициент кроссовера, коэффициент мутации, тип селекции, тип кроссовера, тип мутации, режим завершения расчета оптимизации.

2. Случайная генерация набора исходных решений, формулирующих начальную популяцию.

3. Работа программы расчета установившихся режимов системы с оценкой потерь в ветвях и напряжений узлов (профиль напряжения).

4. Расчет соответствующих значений функций пригодности (целевой функции) каждого решения.

5. Проверка ограничений и использование штрафных коэффициентов, если ограничения не выполняются.

6. Создание новой популяции путем проведения отбора и использования операторов кроссовера и мутации.

7. Создание вновь исходной популяции с повторением последующих этапов алгоритма при неудовлетворении критерия останова.

Пример использования методики. Исследования выполнены на примере типовой региональной распределительной сети системы «АзербЭнержи» со следующими данными: мощность короткого замыкания 500 МВ·А; параметры элементов сети приведены в табл. 2. В табл. 3 показаны нагрузки узлов для уровней: номинального – 100 %, минимального – 80 %, максимального – 125 %. Продолжительность использования данного уровня нагрузки в течение года соответственно 55; 20; 25 %. Принято, что максимальная мощность самой батареи конденсаторов не должна превышать суммарной реактивной мощности узла нагрузки, в нашем случае – 28 квар. В [10] приводится стоимость батарей конденсаторов для разной единич-

ной мощности. Стоимость удельных потерь для рассматриваемой сети – 0,02 дол./($\text{kBt}\cdot\text{ч}$). За нормально допустимые пределы напряжения было принято $U_{\min} = 0,95$ о. е. и $U_{\max} = 1,05$ о. е.

Таблица 2

Результаты потокораспределения												
Узел		Напряжение		Генерация		Мощность		Потокораспределение				
Название	кВ	%	Угол	МВт	Мвар	МВт	Мвар	Название	МВт	Мвар	А	Коэф. мощн., %
№ 404	35,000	96,565	−1,2	0	0	6,178	2,682	№ 405 № 403	−11,347 5,169	−5,818 3,136	217,8 103,3	89,0 85,5
№ 405	35,000	98,677	−0,6	0	0	2,434	1,460	Дубенди 404	−13,964 11,530	−7,530 6,070	265,2 217,8	88,0 88,5
Бузовна	35,000	85,460	−5,2	0	0	0,454	0,272	П/ст3	−0,454	−0,272	10,2	85,8
Дубенди	35,000	100,000	0	49,736	32,105	0	0	№ 405 № 432 П/ст1	14,071 8,511 27,154	7,779 5,385 18,941	265,2 166,1 546,1	87,5 84,5 82,0
№ 406	35,000	89,791	−3,8	0	0	4,031	2,419	П/ст2 ТуркенII № 408	9,565 3,298 −16,894	6,030 2,007 −10,456	207,7 70,9 365,0	84,6 85,4 85,0
№ 407	35,000	85,698	−5,2	0	0	2,754	1,653	П/ст2 П/ст3	−3,665 0,911	−2,200 0,547	82,3 20,4	85,7 85,7
№ 408	35,000	91,751	−3,0	0	0	2,104	1,263	П/ст1 № 406	−19,222 17,118	−12,178 10,915	409,1 365,0	84,5 84,3
№ 432	35,000	97,712	−0,5	0	0	8,365	5,184	Дубенди	−8,365	−5,184	166,1	85,0
№ 403	35,000	95,444	−1,5	0	0	5,124	3,074	№ 404	−5,124	−3,074	103,3	85,8
П/ст1	35,000	95,590	−1,6	0	0	0	0	Дубенди Зирия № 408	−26,439 6,744 19,694	−17,395 4,197 13,197	546,1 137,1 409,1	83,5 84,9 83,1
П/ст2	35,000	87,139	−4,9	0	0	0	0	№ 406 № 407 Туркен I	−9,396 3,717 5,679	−5,667 2,252 3,415	207,7 82,3 125,4	85,6 85,5 85,7
П/ст3	35,000	85,579	−5,2	0	0	0	0	Бузовна № 407 Сейсмо/ст	0,455 −0,910 0,455	0,273 −0,546 0,273	10,2 20,4 10,2	85,7 85,7 85,7
Сейсмо/ст	35,000	85,519	−5,2	0	0	0,455	0,273	П/ст3	−0,455	−0,273	10,2	85,8
Туркен I	35,000	86,948	−5,0	0	0	5,670	3,402	П/ст2	−5,670	−3,402	125,4	85,8
Туркен II	35,000	89,139	−3,9	0	0	3,278	1,987	№ 406	−3,278	−1,987	70,9	85,5
Зирия	35,000	95,048	−1,7	0	0	6,716	4,162	П/ст1	−6,716	−4,162	137,1	85,0

Применение генетического алгоритма позволило определить восемь узлов оптимального размещения БСК.

Расчет и анализ оптимальных размещений БСК в электрической сети. В качестве примера рассматривается фрагмент распределительной электрической сети с 16 узлами. Расчеты потокораспределения без БСК, а также потерь мощности для режимов максимальных нагрузок в электрической сети представлены соответственно в табл. 2 и 3. Как видно из графика профиля напряжений (рис. 1), в значительном числе узлов величины напряжений находятся на уровне, ниже предельно допустимых, – 85–89 %. Суммарные потери в сети – 4,37 %.

Таблица 3

Потери в ветвях									
Ветвь	Поток к узлу		Поток от узла		Потери		Напряжение в узлах, %		Падение напряжения, %
Название	МВт	Мвар	МВт	Мвар	кВт	квар	От	До	
ЛЭП 5	-11,347	-5,818	11,530	6,070	183,3	252,1	96,6	98,7	2,11
ЛЭП 6	5,169	3,136	-5,124	-3,074	44,8	61,6	96,6	95,4	1,12
ЛЭП 2	-13,964	-7,530	14,071	7,779	106,7	248,5	98,7	100,0	1,32
ЛЭП 51	-0,454	-0,272	0,455	0,273	0,5	0,5	85,5	85,6	0,12
ЛЭП 8	8,511	5,385	-8,365	-5,184	146,1	200,8	100,0	97,7	2,29
ЛЭП 18	27,154	18,941	-26,439	-17,395	715,8	1546,2	100,0	95,6	4,41
ЛЭП 41	9,565	6,030	-9,396	-5,667	168,3	363,5	89,8	87,1	2,65
ЛЭП 44	3,298	2,007	-3,278	-1,897	20,3	20,5	89,8	89,1	0,65
ЛЭП 58	-16,894	-10,456	17,118	10,915	223,8	458,8	89,8	91,8	1,96
ЛЭП 47	-3,665	-2,200	3,717	2,252	52,2	52,6	85,7	87,1	1,44
ЛЭП 52	0,911	0,547	-0,910	-0,546	1,1	1,1	85,7	85,6	0,12
ЛЭП 56	19,222	-12,178	19,694	13,197	472,0	1019,5	91,8	95,6	3,84
ЛЭП 19	6,744	4,197	-6,716	-4,162	27,9	35,1	95,6	95,0	0,54
ЛЭП 48	5,679	3,415	-5,670	-3,402	9,3	12,7	87,1	86,9	0,19
ЛЭП 54	0,455	0,273	-0,455	-0,273	0,3	0,3	85,6	85,5	0,06
					2172,4	4273,9			

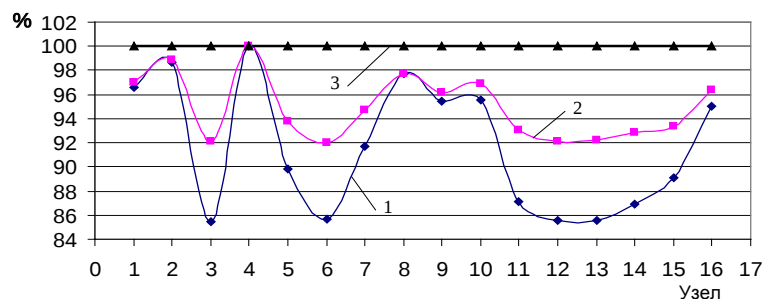


Рис. 1. Профиль напряжения в узлах: 1 – без БСК; 2 – с БСК; 3 – номинал

На рис. 2 представлена схема сети, в узлах которой установлены БСК. В табл. 4 показаны величины мощности БСК, при которых режим электрической сети по величине отклонения напряжения от номинального и величине уменьшения потерь мощности считается оптимальным. Улучшение напряжения после установки БСК в узлах, а также уменьшение потерь легко увидеть из табл. 5. Как видно, потери уменьшаются со значения 4,3 до 3,7 %.

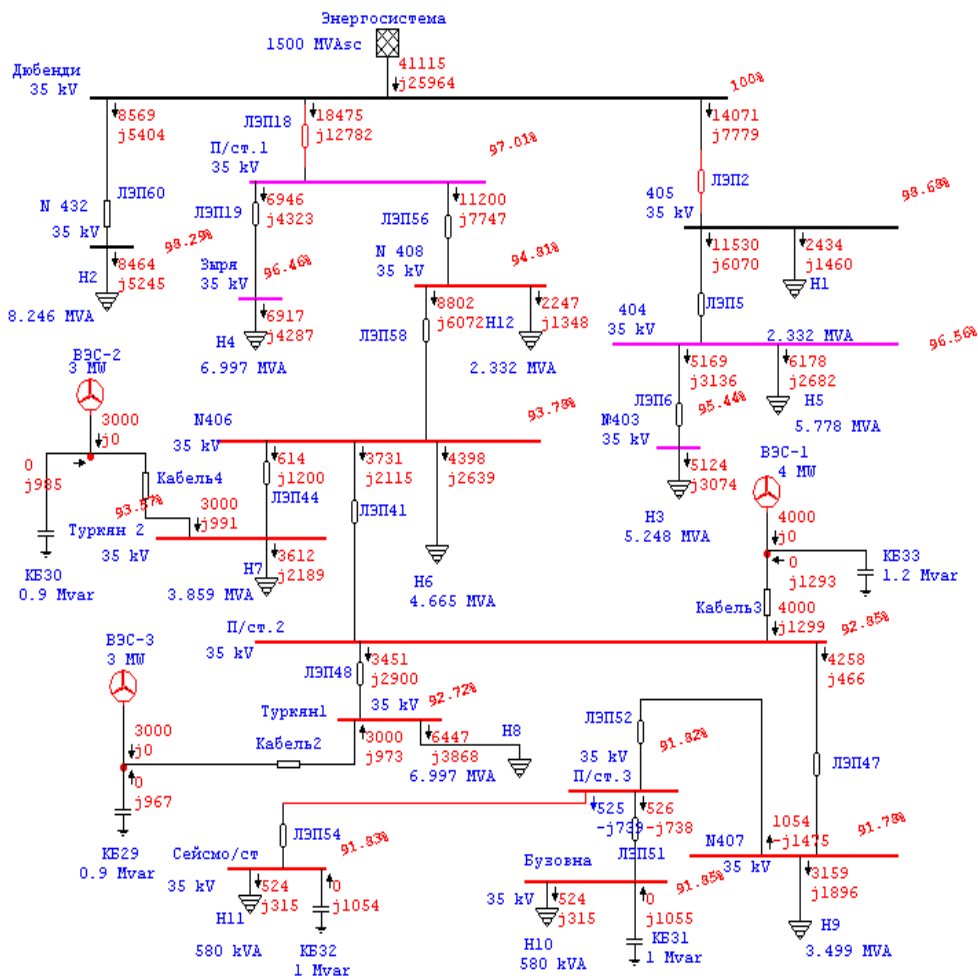


Рис. 3. Схема сети с БСК в узлах

Таблица 4

Результаты оптимального размещения конденсаторов											
Узел-кандидат	Напряжение				Информация о конденсаторах				Стоимость, дол.		
Название	Номинал, кВ	%	Угол	Коэф. мощн., %	Номинал, квар/банка	Норма, кВ	Кол-во банок	Сумма, квар	Расходы на установку	Покупка	Обслуживание/год
№ 404	35,000	96,998	-1,39	91,7							
№ 405	35,000	98,850	-0,65	85,8							
Бузовна	35,000	92,124	-7,96	-70,4	1000,000	37,000	1	1000,000	1000,000	30000,00	300,00
Дубенди	35,000	100,000	0	100,0	1000,000	37,000	1	1000,000	1000,000	30000,00	300,00
№ 406	35,000	93,780	-5,35	85,8							
№ 407	35,000	92,057	-7,71	85,8							
№ 408	35,000	94,763	-4,21	85,8							
№ 432	35,000	97,712	-0,53	85,0							
№ 403	35,000	96,169	-1,80	97,1	1000,000	37,000	2	2000,000	1000,000	60000,00	600,00
П/ст1	35,000	96,934	-2,11	100,0							

Окончание табл. 4

Результаты оптимального размещения конденсаторов											
Узел-кандидат	Напряжение				Информация о конденсаторах				Стоимость, дол.		
Название	Номинал, кВ	%	Угол	Коэф. мощн., %	Номинал, квар/банка	Норма, кВ	Кол-во банок	Сумма, квар	Расходы на установку	Покупка	Обслуживание/год
П/ст2	35,000	93,028	-7,11	100,0	1000,000	37,000	4	4000,000	1000,000	120000,0	1200,00
П/ст3	35,000	92,123	-7,86	100,0							
Сейсмо/ст	35,000	92,188	-7,95	-35,7	1000,000	37,000	2	2000,000	1000,000	60000,00	900,00
Туркен I	35,000	92,885	-7,19	98,1	1000,000	37,000	3	3000,000	1000,000	90000,00	900,00
Туркен II	35,000	93,406	-5,64	-99,3	1000,000	37,000	3	3000,000	1000,000	90000,00	
Зиря	35,000	96,385	-2,25	85,0							
Сумма							16	16000,000	7000,000	480000,0	4800,00

Таблица 5

Суммарные результаты потерь в узлах (при максимальной нагрузке)									
Узел	Поток к узлу		Поток от узла		Потери		Напряжение в узле, %		Падение напряжения, %
Название	МВт	Мвар	МВт	Мвар	кВт	квар	От	До	
ЛЭП 5	-11,471	-4,026	11,636	4,253	165,2	227,1	97,0	98,8	1,85
ЛЭП 6	5,238	1,320	-5,202	-1,272	35,4	48,7	97,0	96,2	0,83
ЛЭП 2	-14,079	-5,719	14,176	5,946	97,5	227,2	98,8	100,0	1,15
ЛЭП 51	-0,528	0,532	0,529	-0,531	0,9	0,9	92,1	92,1	0,00
ЛЭП 8	8,511	5,385	-8,365	-5,184	146,1	200,8	100,0	97,7	2,29
ЛЭП 18	29,294	8,636	-28,685	-7,320	609,1	1315,7	100,0	96,9	3,07
ЛЭП 41	10,912	-1,794	-10,764	2,113	147,6	318,7	93,8	93,0	0,75
ЛЭП 44	3,616	-0,419	-3,599	0,436	16,6	16,7	93,8	93,4	0,37
ЛЭП 58	-18,925	-0,425	19,111	0,807	186,3	381,8	93,8	94,8	0,98
ЛЭП 47	-4,241	0,001	4,285	0,044	44,5	44,9	92,1	93,0	0,97
ЛЭП 52	1,063	-1,908	-1,059	1,912	3,9	4,0	92,1	92,1	0,07
ЛЭП 56	-21,356	-2,154	21,750	3,004	393,7	850,4	94,8	96,9	2,17
ЛЭП 19	6,935	4,316	-6,907	-4,280	28,7	36,1	96,9	96,4	0,55
ЛЭП 48	6,479	1,305	-6,471	-1,294	8,1	11,1	93,0	92,9	0,14
ЛЭП 54	0,530	-1,381	-0,528	1,383	1,8	1,8	92,1	92,2	0,07
					1885,4	3686,1			

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика оптимизации мощности и места установки БСК на основе генетического алгоритма. Критерием оптимальности является минимум затрат на установку и эксплуатацию БСК, а также сокращение потерь электроэнергии в сети при требуемых значениях напряжения и коэффициента мощности.

2. Расчет реальной электрической сети по существующей схеме без БСК и с учетом оптимального размещения БСК показал, что применение данной методики позволяет уменьшить потери электроэнергии в среднем на 15–17 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике / под общ. ред. Ю. Н. Руденко, В. А. Совалова. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 648 с.
2. Железко, Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1985 – 592 с.
3. Baran, M. E. Optimal capacitor placement on radial distribution systems / M. E. Baran, F. F. Wu // IEEE Trans. Power Delivery. – Vol. 4, January 1989. – P. 725–734.
4. Poknavaiko, M. Optimal choice of fixed and switched capacitors on radial distribution feeders by the method of local variations / M. Poknavaiko, Rao K. Prakasa // IEEE Trans. Power apparatus and systems. – Vol. 102, January 1983. – P. 1607–1615.
5. Chis, M. Capacitor placement in distribution system using heuristic search strategies / M. Chis, M. Salama, S. Jayaram // IEEE Proceedings generation, Transmission, Distribution. – Vol. 144, May 1997. – P. 225–230.
6. Optimal capacitor placements in distribution systems / H. D. Chiang [et al.] // IEEE Trans. Power Delivery. – Vol. 5, April 1990. – P. 634–649.
7. Tan, O. T. Neural-net based real-time control of capacitor installed on distribution systems / O. T. Tan, N. I. Santoso. – 1990. – Vol. 5, No 1. – P. 266–272.
8. Chin, H. C. Optimal shunt capacitor allocation by fuzzy dynamic programming / H. C. Chin. – 1995. – Vol. 35. – P. 133–139.
9. Expósito, A. G. A reduced-size genetic algorithm for optimal capacitor placement on distribution feeders / A. G. Expósito, J. L. Ramos, J. R. Santos. – 2004.
10. Capacitor page-study case editor. ETAP 5.5.6 User Guide. – Vol. II.

Поступила 20.10.2009

УДК 621.316

ИСПЫТАНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ И ДИНАМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ

Докт. техн. наук, проф. КОРОТКЕВИЧ М. А., инж. ОЛЕКСЮК И. В.

Белорусский национальный технический университет

В Республике Беларусь имеются четыре завода по производству кабельной арматуры и два – по производству силовых электрических кабелей. Кабельная продукция должна пройти обязательную сертификацию для установления ее потребительских качеств. Проведение сертификации требует больших затрат денежных средств и времени, измеряемого иногда годами (особенно при проведении ресурсных испытаний).

В объем испытаний кабельной продукции входят испытания на: устойчивость к воздействию климатических факторов окружающей среды (мак-